Aus dem Strahlen-Institut
(Prof. Dr. Voltz) der Universitätsfrauenklinik München
(Vorstand: Prof. Dr. Heinrich Eymer)

Strahlenschädigungen und Strahlenschutz

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin

verfaßt und

einer Hohen Medizinischen Fakultät

der Bayerischen Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von

Norbert Schwab

aus Ansbach.

Carl Nieft, Buchdruckerei und Verlag, Bleicherode am Harz

1938

Referent: Professor Dr. H. Eymer

Derz. Dekan: Professor Dr. Broemser

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Diese Dissertation ist gleichzeitig als Broschüre
im Verlag Carl Nieft, Bleicherode a. H., erschienen

Meinen lieben Eltern!

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Die Strahlungen 7
Einige physikalische und technische Vorbemerkungen 7
A. Die Lichtstrahlen 9
a) natürliche Lichtquellen 9
b) künstliche Lichtquellen 9
1. Glühlampen 9
2. Kohlenbogenlampen 9
3. Quecksilberdampflampen 10
B. Die Röntgenstrahlen 10
C. Die Strahlungen der radioaktiven Substanzen 12

Grundlagen der Biologie der Strahlenwirkung . . 12
Strahlenschädigungen 15
I. Schädigungen durch Lichtstrahlen 15
a) Schädigungen durch ultrarote Lichtstrahlen 15
b) Schädigungen durch sichtbare Lichtstrahlen 16
c) Schädigungen durch ultraviolette Lichtstrahlen 16
II. Schädigungen durch Röntgenstrahlen 19
A. Schädigungen in der Diagnostik 19
B. Schädigungen in der Therapie 19
a) Lokale Schädigungen 19
Schädigungen der Haut mit ihren Drüsen und Anhangsgebilden 19
Schädigungen der Schleimhäute 20
Schädigungen des subcutanen Gewebes 21

Seite

Gefäßschädigungen 21
Schädigungen am Nervensystem 21
Schädigungen an Knorpeln, Knochen und Zähnen . . . 22
Schädigungen an der glatten u. quergestreiften Muskulatur 22
Schädigungen am Auge 23
Schädigungen am Kehlkopf 23
Schädigungen an der Lunge 23
Schädigungen im Mediastinum 23
Schädigungen an der Blase 24
Schädigungen an den Drüsen 24
Speicheldrüsen, Leber . . . , Niere . . . , Brustdrüse . , Prostata . . } Drüsen vorwiegend äußerer Sekretion 24
Nebenniere . , Schilddrüse . , Hypophyse . , Thymusdrüse . } Drüsen innerer Sekretion 25
Schädigungen der Generationsorgane 25
a) Schädigungen an den männlichen Keimdrüsen und Keimzellen 26
b) Schädigungen an den weiblichen Keimdrüsen und Keimzellen 27
Fruchtschädigungen 28
b) Allgemeinschädigungen 30
1. Schädigungen am blutbildenden Gewebe 30
Milz
Lymphdrüsen
Thymusdrüse
Knochenmark,
2. Schädigungen des Blutes 30
Leukozyten und Erythrozyten
strömendes Blut
3. Der Röntgenkater 32

Seite

III. Schädigungen durch Strahlungen radioaktiver Substanzen . . . 32
a) Lokale Schädigungen 32
Schädigungen der Haut 32
Schädigungen der Schleimhäute 33
Schädigungen an der Muskulatur 35
Schädigungen am Auge 35
Schädigungen am Ohr 35
Schädigungen an den Drüsen 35
b) Allgemeinschädigungen 36

Strahlenschutz 37
I. Schutzmaßnahmen gegen die Lichtstrahlen 37
II. Schutzmaßnahmen gegen die Röntgenstrahlen 39
A. Direkte Schutzmaßnahmen 39
1. Für die Ärzte und das Personal 39
a) Schutzmaßnahmen bei der Röntgenuntersuchung . . . 39
b) Schutzmaßnahmen bei der Röntgenbehandlung . . . 40
2. Für die Patienten 41
B. Indirekte Schutzmaßnahmen 42
1. Entsprechende Vorbildung 42
2. Vorbeugungsmaßnahmen am Bedienungspersonal 42
III. Schutzmaßnahmen gegen die Strahlungen radioaktiver Substanzen 43

Schluß 46

Literaturangabe 47

Eine allgemeine, systematische und intensive Forschungsarbeit über die biologische Wirkungsweise der Strahlen setzte erst etwa um die Jahrhundertwende ein, und zwar in engem Zusammenhang mit den ersten Berichten über Schädigungen durch Röntgenstrahlen.

Es ist leicht verständlich, daß in dieser kurzen Zeit bei der Fülle der auftretenden Fragen heute nur über die wenigsten ein abschließendes Urteil vorhanden ist. Die sehr umfangreiche Literatur widerspricht sich in vielen Punkten und es kann im Rahmen einer Dissertation nur in großen Umrissen und ohne auf einzelne Fälle näher eingehen zu können über Strahlenschädigungen und Strahlenschutz berichtet werden.

Die Strahlungen.

Einige physikalische und technische Vorbemerkungen.

Unter Strahlung versteht man eine Energieform, die uns als elektromagnetische Schwingung oder als Korpuskular-Strahlung entgegentritt. Zu der ersteren Art gehören die Licht-, Röntgen- und Gammastrahlen, zu der letzteren die Alpha- und Betastrahlen der radioaktiven Substanzen, die Kanal- und Kathodenstrahlen, sowie die Sekundär-Elektronenstrahlen der Röntgenstrahlen.

Die Maxwell- und Faradaysche elektromagnetische Lichttheorie, die heute allgemein anerkannt wird, läßt die Fortpflanzung des Lichtes über einen hypothetischen Äther vor sich gehen, der als dielektrisches Medium aufgefaßt wird. Die Fortpflanzung geschieht in Wellenform mit einer Geschwindigkeit von 300 000 km/sec., wobei ein Transport von Materie nicht stattfindet und die Intensität proportional der Entfernung abnimmt. Die Entstehung der Schwingungen erklärt man sich durch periodische Bewegungen von Elektronen, die

durch hohe Temperaturen oder elektrische Impulse hervorgerufen werden.

Die Wellenenergie neigt zu Ballungen und wird nicht kontinuierlich, sondern diskontinuierlich in geballten Häufungen, den Wirkungsquanten, abgegeben. Je kleiner die Wellenenergie, desto größer das Energiequant. Erst die ultravioletten Strahlen sind im Stande bei Aufprall auf ein anderes Atom aus dessen Atomhülle Elektronen ganz loszulösen (lichtelektrischer Effekt) und dadurch entsteht der große physikalische und biologische Unterschied in der Wirkungsweise gegenüber den längerwelligen Strahlen. Echte Erytheme treten erst von diesen Wellenlängen ab auf. Im Gegensatz zu den Röntgenstrahlen gilt jedoch für die ultravioletten Strahlen, daß mit der Verkleinerung der Wellenlänge die Eindringungstiefe abnimmt.

Wellenlänge und Schwingungszahl stehen in umgekehrt proportionalem Verhältnis. Das Maximum der Strahlenenergie liegt bei einer bestimmten Wellenlänge und verschiebt sich mit steigender Temperatur immer mehr nach der kürzeren Wellenlänge hin.

Man bezeichnet alle elektromagnetischen Schwingungen unter 1 mm als Strahlen. Der Wellenlänge nach kommen zuerst die Wärmestrahlen. Ab 2 400 μμ (1 μμ = 1/1 000 000 mm) beginnen die ultraroten Strahlen. Die sichtbaren Lichtstrahlen haben Wellenlängen von etwa 700 μμ bis 360 μμ. Es folgen dann die ultravioletten Strahlen bis etwa 10 μμ. — Zwischen Licht- und Röntgenstrahlen liegt die sog. Lymanregion, die nur in hochevakuierten Röhren beobachtet werden kann. — An sie schließen sich die weichsten Röntgenstrahlen, die sog. Grenzstrahlen, an. — Dann folgen die eigentlichen Röntgenstrahlen (weich, mittelhart und hart), deren kürzeste Wellenlängen 0,01 μμ betragen. — Unter 0,01 bis etwa 0,0006 μμ liegen die Wellenlängen der Gammastrahlen der radioaktiven Stoffe.

Die bis jetzt nachgewiesenen kürzesten Wellenlängen haben die Höhenstrahlungen (etwa 0,0001 μμ), die von bestimmten Teilen des Sternenhimmels ihren Ursprung nehmen sollen und an Penetrationskraft die Röntgenstrahlen um das Hundertfache übertreffen. Diese kosmische Strahlung scheint eine hemmende Wirkung auf das Wachstum zu haben. Auf der anderen Seite zeigen jedoch Versuche, daß das Fehlen dieser Strahlen ohne ernste Folgen ist (Rulf Bull Engelstad).

Außerdem gibt es noch Erdstrahlen, die den Röntgenstrahlen nahestehen, und durch das feurig-flüssige Erdinnere, besonders aber durch die in der Erdrinde enthaltenen radioaktiven Elemente, verursacht werden.

Die Abgrenzung gegenüber den elektrischen Wellen, die ihrem Wesen nach sich nicht von den Strahlungen unterscheiden, ist durch deren relativ große Wellenlänge gegeben, die bis zu 10 km betragen kann. Die unterste Grenze für elektrische Wellen liegt bei etwa 1 mm (Ultrakurzwellen); der Übergang zu den Strahlungen geschieht also bezüglich der Wellenlängen kontinuierlich, nicht sprungweise.

A. Die Lichtstrahlen.

a) Natürliche Lichtquellen.

Die Sonne ist ein Temperaturstrahler und sendet als solcher ein kontinuierliches Spektrum aus. Die kürzeste unter günstigen Bedingungen gemessene Wellenlänge liegt bei 297 μμ, nach anderen Messungen beträgt sie 289 μμ. Unter ungünstigen Bedingungen, also im Flachlande und im Winter, kann sie sogar nur 313 μμ betragen. Von der Gesamtenergie der Sonne entfallen im Durchschnitt etwa 41 % auf Ultrarot, auf den sichtbaren Spektralteil 58 %, und auf das Ultraviolett nur 1 %.

b) Künstliche Lichtquellen.

1. Glühlampen.

Die Glühlampen sind wie die Sonne Temperaturstrahler und senden ein kontinuierliches der Sonne ähnliches Spektrum aus. Ultraviolette Strahlen sind im allgemeinen nur in Spuren vorhanden. Der ultraviolette Anteil des Spektrums, der bei der „Vitaluxlampe" bis 270 μμ geht, hat auch nur eine geringe Intensität, so daß er praktisch ohne Bedeutung ist. Außer dieser sind noch am weitesten verbreitete Modelle die „Solluxlampe"' und die „Spektrosollampe".

Die therapeutische Bedeutung all dieser Lampen beruht auf Wärmestrahlen.

2. Kohlenbogenlampen.

Die Kohlenbogenlampen senden ein gemischtes Spektrum aus, das aus dem kontinnierlichen Spektrum der Temperaturstrahlung der Elektroden und dem Bandenspektrum des Lichtbogens zusammengesetzt ist. Die älteste Art ist die „Finsenlampe", die als „Finsen-Reynlampe" heute noch verwendet wird. Die „Ultralux-", die „Mebolith-" und die „Jupiter-Lampe", sowie die „Ultrasonne" von Landecker erreichen durch Imprägnieren der Kohlen mit Metallen und Metallsalzen eine wesentlich größere Ausbeute an kurzwelligem Ultraviolett, wobei jedoch die Intensität am kurzwelligen Ende des Spektrums relativ gering ist. Durch die von Peemöller konstruierte Kohlenbogenlampe mit Alluminiumseele wird dieser Mangel weitgehend behoben, sie steht jedoch der künstlichen Höhensonne in Bezug auf Wirtschaftlichkeit des Betriebes wesentlich nach. Die „Kandenlampe" (Mathiesen) zeichnet sich durch Fehlen von Rauchentwicklung aus, hat aber auch den Nachteil der vorigen Lampe. Die „Heliol-" und „Aureollampe" liefern kein biologisch wirksames ultraviolettes Licht.

3. Quecksilberdampflampen.

Bei den Quecksilberdampflampen geht die Strahlung von glühenden Dämpfen aus. Diese Lampen haben daher ein diskontinuierliches Linienspektrum. Um die ultravioletten Strahlen nicht abzuhalten wird Quarzglas verwandt. Die Intensität der Strahlung ist im langwelligen und kurzwelligen Ultraviolett viel größer als bei allen bisher besprochenen Lampen. Der Mangel an langwelliger Strahlung kann durch Zusatzgeräte ausgeglichen werden.

Die Quarzquecksilberlampe der Hanauer-Werke, die sog. künstliche Höhensonne nach Bach, ist eine der ersten und auch leistungsfähigsten Lampen. Im wesentlichen nur technische Unterschiede zeigen die „Kromayer-", „Winsol-" und „Jänickelampe". Die Quarzkadmiumlampe zeichnet sich durch besondere Intensität im langwelligen Ultraviolett (um 340 μμ) aus, wodurch eine größere zellteilungsfördernde Wirkung erreicht werden soll. Die „Ulibrenner", die „Solarcalampe" und die „Ultraleuchtröhre" verwenden statt Quarz ultraviolettdurchlässiges Glas. In der „Solarcalampe" wird durch einen Wolframbogen neben dem Linienspektrum ein kontinuierliches Spektrum hervorgerufen. Die „Ultraleuchtröhre" soll für Massenbestrahlungen verwandt werden.

B. Die Röntgenstrahlen.

Zur Erzeugung der Röntgenstrahlen wird heute wohl allgemein die Hochvakuumröhre verwandt. Das Prinzip dieser Röhre ist das Anlegen einer hohen Spannung (Wechsel- oder heute meist Gleichstrom) in einem nahezu luftleeren Raum zwischen einer Kathode und einer Antikathode, die der letzteren in einem Winkel von 45° gegenübersteht und deren Abstand je nach Verwendung verschieden ist. Die Kathode, die meist aus einer in einen Molybdänkelch eingelassenen Wolframspirale besteht, kann durch einen eigenen Heizstromkreis zum Glühen gebracht werden. Hierdurch entstehen Elektronen, die durch den Kelch gesammelt in geschlossener Bahn zur Antikathode fliegen. An der Stelle, wo die Elektronen auftreffen, dem „Brennfleck", befindet sich an der sonst massiv kupfernen Antikathode eine Wolframronde. Die nahezu mit Lichtgeschwindigkeit auftreffenden Elektronen rufen durch die plötzliche Abbremsung (wenn sie in die sog. Kern- oder Absorptionszone eines Atoms der Antikathode kommen) eine Erschütterung des elektromagnetischen Feldes des getroffenen Atoms hervor, die sich vom Ort der Abbremsung nach allen Seiten mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzt. Dabei wird nur etwa 1 Promill der Energie in diese Strahlung umgesetzt, die von Röntgen entdeckt und nach ihm benannt ist.

Von der vom Brennfleck ausgehenden Strahlung wird nur ein Kegel von etwa 50° Öffnungswinkel, der „Nutzstrahlenkegel", zu medizinischen Zwecken verwandt. Der Austritt jeder anderen Strahlung

wird bei den modernen Röhren durch geeignete Schutzvorrichtungen verhütet.

Außer den Röntgenstrahlen werden in den Röntgenröhren noch Kanalstrahlen und Kathodenstrahlen erzeugt, die den Alpha- und Betastrahlen der radioaktiven Substanzen entsprechen. Da sie jedoch abgeschirmt werden, haben sie bei der Verwendung der Röntgenröhre keine medizinische Bedeutung.

Jedes von Röntgenstrahlen getroffene Atom sendet seinerseits wieder neue Strahlen, die „Sekundärstrahlen" aus. Die Sekundärstrahlung ist entweder eine Elektronenstrahlung, eine Streustrahlung oder eine Eigenstrahlung.

Trifft ein Strahlenquant ein Elektron der Atomhülle mit einer solchen Energie, daß dieses aus seiner Bahn völlig herausgeschleudert wird, so entsteht die Elektronenstrahlung, also eine korpuskuläre Strahlung. Diese ist nach der heutigen Auffassung die alleinige Ursache der biologischen Wirksamkeit der Röntgen- und Gammastrahlen.

Stößt jedoch das Strahlenquant mit einem Elektron der Atomhülle in solcher Weise zusammen, daß die Energie des Stoßes nicht ausreicht das Elektron aus seinem Atomverband zu schleudern, so ändert das Röntgenquant lediglich seine Richtung; die Wellenlänge der neu entstandenen Strahlung, der sogenannten Streustrahlung, bleibt die gleiche.

Außerdem hat aber jedes Element noch die Eigenschaft, daß es beim Auftreffen eines Röntgenstrahles eine Eigenstrahlung aussendet, die für das betreffende Element charakteristisch ist. Wie die Streustrahlen sind auch diese Strahlen echte Röntgenstrahlen. Ihre Wellenlänge ist jedoch größer als die der Primärstrahlen.

Allen Sekundärstrahlungen ist gemeinsam, daß sie im Gegensatz zu den gerichteten Primärstrahlen nach sämtlichen Richtungen auseinander gehen und sich überall im Raum verteilen.

Für Schädigungen durch die Sekundärstrahlung kommt nur die Streustrahlung in Betracht, weil sich die Elektronen der Elektronenstrahlung schon in wenigen Millimetern in der Luft totlaufen und für die Eigenstrahlung sich im Röntgenraum nur wenige Stoffe befinden, die als wesentliche Eigenstrahlensender in Betracht kommen.

Eine Dosierung von Röntgenstrahlen und den Gammastrahlen der radioaktiven Substanzen, die physikalisch meßbar war, erzielte man durch Zurückführen der Luftjonisation der Röntgenstrahlen auf die elektrostatische Einheit. Man konnte so die physikalische internationale Einheit 1r = 1 „Röntgen" genau definieren.

Eine biologische Bestimmung ist durch die HED (Hauteinheitsdosis) gegeben (nach 8 Tagen leichte Hautröte, nach 6 Wochen deutliche Bräunung der bestrahlten Hautstelle). Nach Seitz und Wintz ist eine HED ungefähr gleich 600 r zu setzen.

C. Die Strahlungen der radioaktiven Substanzen.

Die radioaktiven Substanzen haben die Eigenschaft, daß sie sich in einem dauernden Selbstzerfall befinden. Dies geschieht durch Herausschleudern von Kernbruchstücken, die positiv oder negativ geladen sein können. So wird zum Beispiel Radium über Emanation, Radium A — F schließlich zum Radium G, das ein stabiles Element und dem Blei identisch ist.

Die doppelt positiv aufgeladenen Atomteile, die den Kanalstrahlen und also Heliumatomen entsprechen, sind die Alphastrahlen. Sie besitzen eine ungeheuere Anfangsgeschwindigkeit, während ihre Durchdringungsfähigkeit so gering ist, daß sie durch Glas bereits absorbiert werden. In der Medizin werden sie praktisch nur in Form der gasförmigen Emanation verwandt.

Außer den Alphastrahlen werden aus dem Kern noch negative Teile (Elektronen) herausgeschleudert, die Betastrahlen. Sie entsprechen im wesentlichen den Kathodenstrahlen und der Sekundärelektronenstrahlung der Röntgenstrahlen. Von letzteren unterscheiden sie sich nur dadurch, daß sie nicht durch Herausschleudern von Elektronen aus der Peripherie, sondern aus dem Kern eines Atoms entstehen.

Die Gammastrahlen kann man aus ihrem Wesen und ihren Eigenschaften heraus als Röntgenstrahlen kürzester Wellenlänge mit entsprechend erhöhten Durchdringungsfähigkeiten auffassen. Um eine reine Gammastrahlung zu erhalten, müssen Filter verwandt werden, die die Alpha- und Betastrahlen zu absorbieren vermögen, da die meisten radioaktiven Stoffe ein Gemisch von zwei, meistens sogar aller drei Strahlenarten enthalten. Das in der Medizin wichtigste Präparat ist das Radium C, das zwar sehr kurzlebig ist, aber eine sehr intensive Strahlung (Alpha-, Beta- und Gammastrahlen) besitzt.

Während für Röntgenstrahlen nur eine Bestrahlung von außen in Betracht kommt, gibt es für die radioaktiven Substanzen verschiedene Möglichkeiten der Applikation. Die Aufnahme in den menschlichen Körper kann durch die äußere Haut- oder — bei Trinkkuren — durch den Darm, durch Inhalation der gasförmigen Emanation des Radiums oder durch Injektionen erfolgen.

Grundlagen der Biologie der Strahleneinwirkung.

Das Gewebe scheint auf Strahleneinwirkungen nach dem Arndt-Schulz'schen Grundgesetz zu reagieren. Demzufolge fachen schwache Reize die Lebenstätigkeit an, mittelstarke lähmen sie und starke heben sie auf. Die Veränderungen sind anatomisch, makroskopisch oder histologisch nachweisbar, können aber auch funktioneller Natur sein.

Der Auflösungsprozeß kann sich auf die ganzen Zellindividuen erstrecken, die bei höheren Dosen vollkommen absterben und, wenn sie sich in lebenswichtigen Organen befinden, beim Tierversuch und auch beim Menschen den Tod verursachen können. Dies ist dann meistens durch Veränderungen des Blutes und der blutbildenden Organe bedingt.

Die Strahlenwirkungen treten erst nach einer gewissen Latenz an den Zellen auf. Sie klingen um so rascher ab, je weiter die verabfolgte Dosis unter der Toleranzgrenze des betreffenden Gewebes liegt.

Das von Grothus und Draper aufgestellte Fundamentalgesetz der Strahlenwirkung besagt, daß nur absorbierte Strahlen wirksam sind.

Wenn es demnach möglich ist an dem Ort des biologischen Geschehens die notwendigen Energien zur Wirksamkeit, also zur Resorption, zu bringen, so ist die Strahlenwirkung vollständig unabhängig von der Art der Strahlung. Korpuskularstrahlen rufen die gleichen morphologischen und chemischen Veränderungen hervor wie die elektromagnetischen Schwingungen. Dies geht auch aus der Auffassung hervor, daß die Wirkung der Strahlen, wie schon erwähnt, auf einer sekundären Elektronenausstrahlung beruht.

Auch die Härte der Strahlung ist somit völlig gleichgültig, es gibt keine Spezifität der Wellenlänge. Wenn praktisch trotzdem zur Erreichung bestimmter Wirkungen mit bestimmten Wellenlängen gearbeitet wird, so liegt dies nicht an der spezifischen Wirkung der Strahlen, sondern an der verschiedenen Verteilung und Absorption in den einzelnen Gewebeabschnitten.

Die Applikationsweise ist nicht gleichgültig, sondern es gilt der Satz: „Je größer die Minutendosis, desto größer die Wirkung." Bei verteilten Strahlendosen ist die Kumulation um so unvollständiger, je lebhafter der Stoffwechsel und die Vermehrung der Zelle ist; vollständige Kumulierung findet nur im Zustand des latenten Lebens statt.

Nach öfteren Bestrahlungen kann es aber auch zu einer gewissen Gewöhnung kommen, die dann zu einer relativen Strahlenfestigkeit führen kann. Bestrahlt man zum Beispiel durch die Haut ein tiefer gelegenes Gewebe, so kann man oft Kumulation und Gewöhnung nebeneinander beobachten. Das zu bestrahlende Gewebe reagiert nach anfänglichen degenerativen Erscheinungen überhaupt nicht mehr auf die Bestrahlungen, während die Haut eine gesteigerte Empfindlichkeit aufweist, die mit einer Entzündung verbunden ist.

Der Angriffspunkt der Strahlung ist nach Ansicht der meisten Autoren die Zelle.

In der Zelle ist besonders auf Grund der Beobachtungen von Oskar Hertwig, sowie seiner Mitarbeiter Günther und Paula Hertwig, bei Radiumbestrahlungen am reifen Samen von Fröschen anzunehmen, daß die Strahlenwirkung in erster Linie an der Kernsubstanz

angreift. Schon durch kurze Bestrahlung mit 2 mg Radiumbromid während 5 Minuten wurden die Kernteilungsfiguren geschädigt und eine Verzögerung der Entwicklung und schließlich der Zerfall der Zellen und der Tod herbeigeführt. Auch der Prozeß der Zellteilung wurde außerordentlich verlangsamt. War die Bestrahlung schwach, so blieb die Teilung der bestrahlten Eier hinter der der Kontrolltiere sehr zurück, war sie stärker, so kamen die Eier nicht über das Zweiteilungsstadium hinaus oder blieben zum großen Teil ganz ungeteilt. Die Ursache all dieser Störungen beruht auf einer Veränderung des Chromatins, hervorgerufen durch Beeinflussung der Chromosomenbildung und durch Chromatinzerfall.

Nach Bestrahlung junger Embryonalstadien, wie des zweigeteilten Eies, der Morula, Blastula, Gastrula und Neurula, stellten sich auch nach längerer Latenzzeit Entwicklungsstörungen ein, die um so ausgesprochener waren, je jünger der Keim war. Besondere Empfindlichkeit zeigte dabei der Übergang vom Blastula- zum Gastrulastadium.

Das Zellplasma wird durch die Strahlen auch geschädigt, aber bedeutend weniger als die Zellsubstanz.

Die Zelle kann auf die Strahleneinwirkung mit Nekrobiose, Zelldegeneration oder Anomalien im Vorgang der Zellteilung reagieren.

Bezüglich der Zellfunktionen ist zu sagen, daß die Genozeptoren, die Träger der Fortpflanzungsfähigkeit, besonders leiden, während die Nutrizeptoren, die Träger der Ernährung, und die Zellmotilität nur sehr wenig betroffen werden.

Die Schädigung kann reversibel oder irreversibel sein.

Die Empfindlichkeit für Strahlen ist bei den einzelnen Zellen sehr verschieden. Eine starke Erhöhung der Strahlenempfindlichkeit finden wir bei den in Teilung begriffenen Zellen. G. Hertwig nimmt an, daß das Chromatin im Chromosomenstadium der Strahlung eine vergrößerte Angriffsfläche bietet.

Dies entspricht auch der meist vertretenen Theorie, daß die Einwirkung der strahlenden Energie auf alle lebenden Zellen im Sinne „einer ultramikroskopischen Beschießung" ihrer kleinsten Bestandteile, das heißt ihrer Atome, erfolge. Am dichtesten stehen diese in der Kernsubstanz und darum ist die Strahlenwirkung dort auch am stärksten.

Leider variiert der Rhythmus der Mitosenbildungen bei menschlichen Tumoren ziemlich stark und somit ist auch die Zeitbestimmung für die wirksamste Bestrahlung sehr schwer zu finden.

Eine erhöhte Strahlenempfindlichkeit kann man auch bei Temperatursteigerungen feststellen. Erhöhung des Stoffwechsels und der Durchblutung der Gewebe vermehrt ebenfalls die Strahlenempfindlichkeit (entzündliche Prozesse!). Von großer Bedeutung ist auch die Konstitution des Gesamtorganismus, ferner das den bestrahlten Bezirk umgebende Gewebe, sowie der Quellungszustand der Kolloide.

Das Gesetz von Bergonié und Tribondeau besagt, daß die Strahlenempfindlichkeit tierischer Zellen mit fortschreitender Entwicklung abnimmt. Je größer ihre Neubildungskraft, je länger ihre karyogenetische Phase, je weniger differenziert sie sind, desto strahlenempfindlicher sind sie. Dies gilt auch für krankhaft vermehrte Proliferation und Wachstumstätigkeit. Man kann das jedoch nicht als eine spezifische Wirkung der Strahlen ansprechen, da es bei Reizen anderer Art in gleicher Weise der Fall ist.

Hoch differenzierte Zellen, die die Funktion gegenüber der Vermehrung in den Vordergrund gestellt haben, wie zum Beispiel Leber, Muskulatur und Zentralnervensystem, sind wenig strahlenempfindlich. Ein Organ, das in der Jugend sehr strahlenempfindlich war, kann nach abgeschlossener Entwicklung Strahleneinwirkungen gegenüber fast vollkommen resistent sein (Zentralnervensystem, Sinnesorgane).

Die Strahlenempfindlichkeit der einzelnen Zellgruppen ist somit sehr verschieden und von einer großen Anzahl sehr variabler Größen abhängig. Bestimmte Strahlenmengen, die gewisse Zellverbände bereits auf schwerste schädigen oder abtöten, beeinträchtigen andere Zellgruppen nur relativ wenig in ihren Lebensfunktionen.

Eine spezifisch morphologische Strahleneinwirkung gibt es demnach nicht und eine so ausgesprochene elektive Wirkung, wie wir sie bei manchen Arzneimitteln finden, können wir jedenfalls der Strahlenenergie nicht zuschreiben.

Eine Bestrahlung ist daher, da sie als physikalisches Reizmittel immer auf alle Zellen, die von Strahlen getroffen werden, mehr oder weniger einwirkt, als allgemeines Zellgift zu betrachten — ich weise hier besonders auf die indirekte Fruchtschädigung, sowie die Bluterkrankungen hin! Wie jedes Arzneimittel kann sie daher für den Organismus je nach Dosierung nützlich oder auch schädlich sein.

Um eine elektive Strahlenwirkung zu erzielen, wird man daher diese durch „topographisches Zielen" auf die zu bestrahlende Zellgruppe nach Möglichkeit beschränken und auf diese Art, sowie durch exakte Dosierung den übrigen Organismus nach Kräften schonen.

Strahlenschädigungen.

I. Schädigungen durch Lichtstrahlen.

a) Schädigungen durch ultrarote Lichtstrahlen.

Die ultraroten Strahlen sind Wärmestrahlen und haben entsprechend ihrer Wellenlänge eine hohe Penetrationskraft. Besonders, wenn die Schutzreaktion des Körpers, die Melaninbildung, fehlt, können sie zentimetertief in diesen eindringen.

Mit den sichtbaren roten Strahlen zusammen, von denen aber größere bei der Absorption entstehende Wärmemengen ertragen werden, können sie bis durch die Schädelknochen — besonders bei Kindern — gelangen und einen Sonnenstich durch Reizung der Hirnhäute und des Gehirns hervorrufen.

Bei Arbeitern, die mit offenem Feuer zu tun haben, also Schmieden, Schmelzarbeitern, besonders aber Glasbläsern, tritt der Feuer- oder Glasbläserstar auf. Er ist durch einen trüben Ring am hinteren Linsenpol gekennzeichnet. Wie Schläpfer nachweist, wird er nicht durch die Wärmeentwicklung, — Heizer bekommen ihn nicht! — sondern durch penetrierendes Ultrarot hervorgerufen.

Auch die chronische Bindehautentzündung der Schmelzer, Heizer und Bäcker ist durch ultrarote Strahlung bedingt.

Ebenso hat die Entstehung des Altersstars wahrscheinlich einen Zusammenhang mit diesen ultraroten, vielleicht auch den ultravioletten Strahlen.

b) Schädigungen durch sichtbare Lichtstrahlen.

Neben den Sensibilisierungskrankheiten, die aber auch durch ultraviolette Strahlen hervorgerufen werden, und unter diesem Abschnitt zu finden sind, können besonders Schädigungen an den Augen durch diese Strahlen auftreten.

Die sichtbaren Lichtstrahlen gehen bis zur Netzhaut. Nach Blendung durch Tageslicht oder auch bei Kurzschluß kann ein anfallsweise auftretendes Rotsehen (Erythropsie) oder auch eine Verschattung von fixierten Gegenständen (Skotome der macula lutea) besonders bei Staroperierten auftreten.

Häufig kommen bei Fliegerbeobachtungen oder beim Betrachten von Sonnenfinsternissen Ringskotome vor, verschwinden aber meist wieder.

Durch Brennglaswirkung der Linse besteht jedoch auch die Möglichkeit, daß exudative und degenerative Veränderungen im Pigmentepithel und der Aderhaut entstehen, die dauernde Sehstörungen verursachen können.

Beim Arbeiten in der Nähe von Glüh- oder Bogenlampen treten oft chronische Grelleschäden durch Entarten der Netzhautmitte mit Flimmern vor den Augen und schlechter Dunkeladaption auf.

Durch Blendungen bei Skitouren können gelegentlich Störungen der Farbsinnsempfindung bedingt sein.

c) Schädigungen durch ultraviolette Lichtstrahlen.

Nach Untersuchungen von Freund durchdringen Strahlen bis zur Wellenlänge von 325 μμ die Epidermis und können also vom Blut absorbiert werden. Diese Möglichkeit ist aber sehr umstritten. Tatsache ist, daß eine starke Reaktion der Blutbildungsstätten und Blutreservoirs nach Ultraviolettbestrahlung auftritt.

Diese Reizung kann auch eine Vermehrung von Plasmodien hervorrufen, wie in Italien die Malariarückfälle im Frühjahr nach Winterlatenz und das Auftreten von Schwarzwasserfieber zeigen.

Für eine aktive Tuberkulose und epidemische Kinderlähmung kann eine Ultraviolettbestrahlung die schwersten Folgen nach sich ziehen.

Nach künstlicher Bestrahlung mit ultraviolettem Licht oder nach Besonnung besonders bei Rückspiegelung durch Wasser, Schnee oder Eis tritt je nach Dosis

1. ein Wärmeerythem auf, das innerhalb weniger Stunden wieder verschwindet,
2. ein photochemisches Erythem nach ein- oder mehrstündigem Latenzstadium, das nach Schröter durch Strahlen mit Wellenlängen von 360 μμ bis 292 μμ bedingt ist. Der Gipfel der Strahlenwirksamkeit liegt dabei etwas unter 300 μμ.

Bei längerer Strahleneinwirkung oder erhöhter Disposition können auch Blasenbildungen und Hämorrhagien, Fieber und Kopfschmerzen auftreten. Aber selbst in diesem Falle tritt meist Ausheilung mit Abschilferung oder Schuppung nach einiger Zeit ein. Vorgänge, die der Verbrennung dritten Grades entsprechen, kommen äußerst selten vor.

Die Schädigungen sind um so geringer, je stärker die auftretende Pigmentation ist. Diese ist wieder von Rasse, Aufenthaltsort, Haar- und Hautfarbe abhängig.

Eine Schädigung tieferer Gewebsschichten tritt aber selbst bei Pigmentarmut nicht auf.

Besteht jedoch eine echte Idiosynkrasie gegen Licht, so zeigen sich viel weitgehendere Folgen. Der ganze Körper steht dann unter dem Einfluß einer Sensibilisation. Man bezeichnet diese erhöhte Disposition bei Zuführung der sensibilisierenden Stoffe durch die Nahrung oder durch Medikamente als exogene, bei Entstehung durch abnorme Stoffwechselvorgänge im Organismus selbst als endogene Sensibilisation. Eine für andere harmlose Belichtung oder Bestrahlung genügt dann, um ernste Allgemeinerscheinungen hervorzurufen.

Exogene Sensibilisationskrankheiten:

Der Fagopyrismus bei Schafen, auch Rindern und Schweinen, hervorgerufen durch das Fluorophyll im Buchweizen. Die Krankheit äußert sich in Erregungszuständen in der Sonne, aber nur bei hellfarbigen Tieren.

Die Eosinkrankheit des Menschen nach langdauerndem Eosingenuß mit Rötungen, Schwellungen, Ulcerationen und Ablösung der Fingernägel.

Die Steinkohlenteerpechaffektion (nach L. Lewins), die mit einer diffusen Rötung und Jucken an den mit Licht zugänglichen Stellen einhergeht.

Die Verschlimmerungen der Pellagra im Sommer führt Raubitschek auf einen sensibilisierenden Farbstoff im Mais zurück.

Endogenen Sensibilisationskrankheiten:

Bei der Hydroa aestivalis ruft schon mäßiges Licht Hautblasen hervor. Die Krankheit kann zu furchtbaren Entstellungen führen, wie man sie bei Lepra und Syphilis auftreten sieht. Die Sensibilisation ist wahrscheinlich durch Porphyrine hervorgerufen.

Ekzema solare ist ein echtes, auf Belichtung mit Bildung von Knötchen und Bläschen einhergehendes Ekzem.

Bei dem erblichen Xeroderma pigmentosum entstehen nach Belichtungen Rhagaden und Warzenbildungen, die zur Krebsentwicklung Veranlassung geben können.

Etwa dasselbe Krankheitsbild zeigt die „Seemannshaut".

Hyde nimmt ganz allgemein Beziehungen zwischen Hautkrebs und Belichtung an (relative Immunität der Neger!).

Das Vergrößern von Variola- und Varizellenpusteln nach Belichtung ist vielleicht auch ein Sensibilisierungsvorgang.

Ein Zusammenhang mit hämorrhagischer Diathese, Skorbut und Lungenblutungen wird vermutet, ist aber noch nicht geklärt.

Tod durch Licht ist wahrscheinlich nur nach Sensibilisierung möglich.

Wirkungen auf das Auge: Das ultraviolette Licht über 350 μμ schädigt die Linse, indem sich die ultraviolette Strahlung durch Fluoreszenz in langwelligeres Licht umwandelt und dadurch eine Trübung verursachen kann. Unter gleichzeitiger Mitwirkung von ultraroten Strahlen entstehen so die gewerblichen Stare.

Die ultravioletten Strahlen unter 350 μμ bleiben schon in der Binde- und Hornhaut stecken und schädigen sie. Besonders bei Skitouren kann eine solche Strahlenkeratitis (Schneeblindheit) auftreten.

Die Ophthalmia electrica tritt bei Arbeiten an elektrischen Hochöfen, elektrischen Schweißapparaten oder Quecksilberlampen und Gleichrichtern auf. Es entsteht ein Schwellungskatarrh der Bindehaut, Iritis und Lichtscheu, in seltenen Fällen Trübung der oberflächlichen und tiefen Hornhautschicht.

Früher hatten Filmschauspieler durch offene Bogenlampen vielfach eitrige Binde- und Hornhautentzündung, was heute durch Abschirmen der Strahlen mit Glas nicht mehr vorkommen kann.

Auf Grund neuester Untersuchungen an Drosophilastämmen kommt Edgar Altenburg zu dem Schluß, daß das ultraviolette Licht direkt während der Bestrahlung auch Mutationen hervorrufen kann.

II. Schädigungen durch Röntgenstrahlen.

A. Schädigungen in der Diagnostik.

Nur ein verschwindend geringer Prozentsatz der Schädigungen ist auf Bestrahlungen zu diagnostischen Zwecken zurückzuführen, da es heute möglich ist, die absorbierten Energieeinheiten unter die Toleranzgrenze herabzudrücken und somit das Gewebe eigentlich nur auf Grund von Überdosierungen geschädigt werden kann.

Am Kopf können nach der Durchleuchtung bei Kindern Reizerscheinungen der Menigen auftreten, bei Matronen durch Hypophysenwirkung Veränderung der Sympathicusinnervation, am Hals Perioden von verminderter Schilddrüsentätigkeit, am Oberbauch neben abnormen Menstruationen auch schwere Allgemeinstörungen und am Becken Überfunktionen von debilen Keimdrüsen.

Die weitaus überwiegende Mehrzahl der Schädigungen ist jedoch auf therapeutische Bestrahlungen zurückzuführen.

B. Schädigungen in der Therapie.

a) Lokale Schädigungen.

Schädigungen der Haut mit ihren Drüsen und Anhangsgebilden.

Die Hautempfindlichkeit schwankt und scheint nach Verabreichung von pharmakologischen Mitteln, sowie nach Masern erhöht zu sein. Auch eine konstitutionelle Überempfindlichkeit ist scheinbar bei manchen Individuen vorhanden.

Außer der Frühreaktion mit ödematöser Schwellung und Rötung, die keine eigentliche Schädigung darstellt, kann eine akute und chronische Strahlendermatitis auftreten.

Bei der akuten Strahlendermatitis kann man nach der Schwere der Hautreaktion

1. eine Desquamation mit Haarausfall und folgender Pigmentation beobachten,
2. nach zweiwöchentlicher Latenzzeit ein Erythem mit Hyperaemie, Schwellung und Infiltration,
3. nach einwöchentlicher Latenzzeit ein blaurotes Erythem mit stärkeren Schmerzen, das gelegentlich in Blasenbildung übergeht, relativ gutartig ist und im allgemeinen nach sechs Wochen spätestens ausheilt,
4. nach zweitägiger Latenzzeit ein blaurotes Erythem mit stärksten Schmerzen unter Auftreten von Blasen, geschwürigem Gewebszerfall und späterer Schorfbildung, wobei eine Überhäutung von der Peripherie her oft erst nach Jahren auftritt.

Das eigentliche sogenannte Röntgenerythem ist eine Entzündung, die durch die bei der Degeneration der Haut, beziehungsweise der zentralen Zellteile eines bestrahlten Organes überhaupt, freiwerdenden Abbaustoffe hervorgerufen ist. Eine große Rolle spielen dabei auch die Gefäßschädigungen.

Die Haarpapillen und Schweißdrüsen, auch die Nagelmatrix, aber wesentlich weniger die Talgdrüsen können infolge ihrer hohen Strahlenempfindlichkeit ebenfalls leicht zerstört werden.

Die chronische Strahlendermatitis tritt meist an der Streckseite der Hände und der Finger auf und zwar besonders bei Ärzten und Röntgentechnikern, die ja gerade an diesen Stellen — früher häufig sogar ungeschützt — der Strahlenwirkung ausgesetzt sind.

Die Krankheit äußert sich in einem Trockenwerden der Haut, einer Hyperämie und Pigmentierung, schließlich in einer typischen Hyperkeratose mit Rhagadenbildung. Die Cutis zeigt ein interstitielles Ödem. Histologisch ist eine Schädigung besonders des Stratum germinativum, das eine große Proliferationsfähigkeit besitzt, der Gefäßendothelien im Corium und der Bindegewebszellen nachzuweisen.

Die Veränderungen an der Haut sind zum großen Teil durch eine primäre Gefäßschädigung bedingt, was aber nach der Ansicht mancher Autoren mehr bei der akuten Strahlendermatitis der Fall ist.

Im weiteren Verlauf kann es zu Gelenkversteifungen, Bildung von Kontrakturen, Ulcerationen und auch zum Carcinom kommen.

Das Röntgencarcinom entsteht nie auf der gesunden Haut, sondern nur auf dem Boden einer chronischen irreparablen Hautveränderung, wie es uns das Krankheitsbild der chronischen Strahlendermatitis als Spätschädigung durch Gefäßveränderungen bietet. Es geht von dem verhornenden Plattenepithel aus, zeigt ein starkes Tiefenwachstum mit erheblicher Zellinfiltration und entspricht etwa der Krebsbildung bei Xeroderma pigmentosum oder der „Seemannshaut". Die Inkubationszeit beträgt im Mittel neun Jahre. In etwa 25 % der Fälle treten Metastasen auf, die auch einen anderen Aufbau wie das primäre Carcinom haben können. Nach Lupusbestrahlung entstandene Carcinome brauchen nicht unbedingt durch die Bestrahlung verursacht sein. Das gilt besonders dann, wenn sie bald nach der Bestrahlung auftreten, denn das Röntgencarcinom braucht lange zur Entwicklung.

Eine sehr seltene Erkrankung ist das Röntgenexanthem.

Schädigungen der Schleimhäute.

Die Schleimhäute sind kaum weniger empfindlich als die äußere Haut. Man kann oft schwere Ulcerationen durch Intimaschädigung beobachten.

In der Mundhöhle tritt nach Bestrahlung am weichen Gaumen eine Epitheliolyse auf, während der harte Gaumen eine Desquamation aufweist.

Den Darm rechnet man heute vielfach zu den strahlenempfindlichsten Teilen des menschlichen Körpers und zwar ist der Dünndarm um etwa 30 % der HED weniger empfindlich gegen Strahlung als der Dickdarm (Wintz). Katarrhe, Ulcera, die bei der Heilung Strikturen bilden, und Nekrosen wurden schon in allen Abschnitten des Magendarmtraktus beobachtet. Sehr häufig treten Spätschädigungen auf. Auch die Lieberkühnschen Drüsen und die lymphatischen Elemente sind sehr empfindlich. Große Vorsicht ist nach Operationen mit der Dosierung am Platze.

Die Ursache der Darmschädigungen führt O. Strauß auf eine Gefäßschädigung, O. Meyer auf eine Schädigung des Gefäßnervenapparates zurück.

Auch die serösen Häute weisen Schädigungen auf, die man mit „Peritonealschwiele" und „Pleuraschwiele" bezeichnet.

Schädigungen des subcutanen Gewebes.

Die Schädigung an diesem Gewebe ist durch die „Röntgenschwiele" = „Induration" = „chronisch induriertes Hautödem" gekennzeichnet und durch eine Schädigung der tieferen Lymphbahnen bei Strahlenmengen von rund 130 % der HED bedingt. Insbesondere die heute hauptsächlich verwandten harten Strahlen sollen diese Veränderungen verursachen.

Gefäßschädigungen.

Die Gefäßschädigungen gehören zu den Spätschädigungen. Sie bestehen in einer Verdickung der Intima, die zum Verschluß der Gefäße und irreparablen Folgezuständen, wie Pigmentierungen, Hautatrophie und Erweiterung der Capillaren führen kann. Die Quellung der Endothelzellen beruht auf einer allmählichen Schädigung der Teilungsfähigkeit der Zellen, die in der ersten Generation noch nicht aufgehoben ist, sondern erst in mehreren Generationen sich spontan erschöpft. Dies scheint durch eine besondere Empfindlichkeit der Endothelzellen für Röntgenstrahlen und entsprechend langer Erholungszeit bedingt zu sein, so daß bei häufiger Bestrahlung durch Kumulation eine Schädigung der Genozeptoren eintritt, die zur Produktion von neuen, nicht widerstandsfähigen Endothelzellen führt.

Schädigungen am Nervensystem.

Das Zentralnervensystem gehört zweifellos zu den am wenigsten strahlenempfindlichen Teilen des Organismus und ist nach abgeschlossener Entwicklung selbst bei mehrfachen Hautdosen fast vollkommen strahlenunempfindlich. Beim ausgewachsenen Menschen ist nach Scholz nur ein einziger Fall bekannt, wo nach der bei der Röntgenbestrahlung verwandten üblichen Dosis bei einer Trichophytie

nach 2 Jahren encephalitisähnliche Erscheinungen mit Wachstumsstörungen und epileptischen Anfällen auftraten.

Beim wachsenden Organismus scheint eine erhöhte Strahlenempfindlichkeit vorhanden zu sein. Schaltenbrand berichtet über eine Pachymeningitis, Hirnatrophie mit epileptischen Anfällen und Alopecie nach Bestrahlung eines kindlichen Schädels. Beim Hunde wurde an der reifenden Gehirnsubstanz mehrfach ein Auftreten von Ataxie und Tremor nach Bestrahlungen beobachtet.

Die Hypophyse, vielleicht auch das Zwischenhirn scheint strahlenempfindlicher als die übrige Hirnsubstanz zu sein.

Am peripheren Nerven ist deutlich eine Schmerzstillung und Krampfverminderung nach Röntgenbestrahlungen zu beobachten. Man betrachtete dies früher als direkte Wirkung auf die Nervenenden (Änderung der Leitfähigkeit?), führt aber heute die Analgesie auf eine Gefäßwirkung zurück und sucht auch damit die gefürchtete Frühreaktion bei Schädelbestrahlungen zu begründen.

Schädigungen an Knochen, Knorpeln und Zähnen.

Es sind Fälle beschrieben worden, wo nach Intensivbestrahlung einer Handgelenks-, ein anderes Mal einer Kniegelenkstuberculose eine Amputation vorgenommen werden mußte. Auch trat einmal eine Spätnekrose am Unterkiefer nach einer Operation an einem Unterlippencarcinom auf.

An gesunden, ausgewachsenen und von intakter Haut bedeckten Knochen und Knorpeln sind jedoch bei mittleren Strahlendosen Schädigungen noch nicht beobachtet worden.

Wesentlich empfindlicher für Strahlen ist der junge heranreifende Knochen und Knorpel. Es wurde eine Verlangsamung der Callusbildung und eine Verknöcherung an den Rippenknorpeln jugendlicher Personen, die berufsmäßig den Strahlen ausgesetzt waren, beobachtet. Deshalb beträgt auch die Grenzdosis bei Säuglingen 25 %, bei Kindern 50 % der HED.

Die Zähne scheinen für Strahleneinwirkungen nicht empfindlich zu sein. Es ist jedoch auch ein einziger Fall von vollkommener Zerstörung der Zähne des Unterkiefers nach Halsdrüsenbestrahlung bekannt (P. P. Gotthardt).

Schädigungen an der glatten und quergestreiften Muskulatur.

Die Muskulatur ist — abgesehen vom embryonalen Stadium — bei mittleren Dosen sehr wenig strahlenempfindlich und nur ein einziger Fall einer isolierten Schädigung, eine „spezifische" Schädigung des Herzmuskels (Schweizer), ist bis jetzt beschrieben worden. Bei Dosen über 180 % der HED beobachtete Händly Degenerations-

erscheinungen bis zum völligen Untergang der glatten und quergestreiften Muskelzelle.

Schädigungen am Auge.

Im Gegensatz zu der früheren Auffassung betrachtet man heute das Auge als außerordentlich strahlenempfindlich besonders für Intensivbestrahlungen. Häufig kommt es zum Verlust der Wimpern, zu einer Blepharitis, Conjunktivitis oder Ptosis durch Lidschwellung. Nach Bestrahlung eines Aderhautsarkoms, das in sachkundigster Hand 80 % der HED in 9 Bestrahlungen erhalten hatte, zeigte sich zum Beispiel kurz nach der ersten Serie eine hartnäckige Keratitis, Gefäßstörungen an Netzhaut und Iris folgten, ein Katarakt trat auf und endlich machte ein Glaukom die Entfernung des erblindeten Auges nötig. Ähnliche Erscheinungen wurden bei einem Lidkankroid und in mehreren anderen Fällen beobachtet. Der Röntgenstar tritt nach Schläpfer beim Menschen erst 2 — 4 Jahre nach der Bestrahlung auf.

Schädigungen am Kehlkopf.

Der Kehlkopf scheint ein strahlenempfindliches Organ zu sein. Die akuten Erscheinungen bestehen in Trockenheitsgefühl, Schwellungen, Beläge, Rötungen an Uvula, Rachenwand und Larynxeingang, gehen aber größtenteils bald wieder zurück.

Viel schwerwiegender sind die Spätschädigungen, die zu Kehlkopfgangrän und Exitus führen können, wobei wieder eine Gefäßschädigung oder eine Insuffizienz des Gefäßnervenapparates als Ursache in Frage kommt. Häufig treten auch Spätschädigungen an Stimmbändern, Taschenbändern und Aryknorpel auf. Ein großer Teil der Schädigungen läßt sich vermeiden, wenn man mit der Tiefendosis nicht über 100 % der HED hinausgeht.

Schädigungen an der Lunge.

Nach Wintz und Kaestle können sich infiltrative Prozesse entwickeln. Die Alveolen sind mit Exudat gefällt, die Alveolenwand ist stark durchblutet und verdickt, das Bindegewebe ist in späteren Stadien vermehrt. Es bietet sich das Bild einer Fibrose. Die Erythemdosis beträgt 180 — 200 % der HED. Der Zustand ist zwar an sich ungefährlich, kann aber verhängnisvoll werden beim Hinzutreten einer Pneumonie, wo es dann leicht zum Exitus kommen kann.

Schädigungen im Mediastinum.

Bei Mediastinaltumoren kann es nach Bestrahlungen infolge akuter Anschwellung zu bedrohlichen Erstickungserscheinungen kommen, wobei aber noch nie Todesfälle beobachtet wurden.

Schädigungen an der Blase.

An der Blase kann Gangrän auftreten, was aber viel häufiger nach Radiumbestrahlungen beobachtet wird. Blasen-, Scheiden- und Rektalfisteln, sowie Ulcera als Spätschädigung kommen öfters vor.

Schädigungen an den Drüsen.

Die Strahlenempfindlichkeit der Drüsen ist im allgemeinen wesentlich geringer als die des Hautepithels.

Drüsen vorwiegend äußerer Sekretion:

Bei den Speicheldrüsen setzt nach vorübergehender Funktionseinstellung mit eventuell teilweiser „tiefer Frühreaktion" ein symptomloses Stadium von 2—4 Wochen ein. Hierauf folgt bei genügend starker Dosis eine zweite, länger dauernde Funktionsstörung, welche als Krankheit der übergeordneten Zellteile (Kern) aufzufassen ist.

Ein ähnliches Verhalten findet man auch bei vielen anderen drüsigen Organen.

Die Leber ist in ausgewachsenem Zustand sehr wenig strahlenempfindlich. Wetzel berichtet aber auch über eine Nekrose des linken Leberlappens nach Bestrahlung eines Magencarcinoms. Das Gewebe wird jedoch um so empfindlicher, je jünger das Individuum ist. Bei intensiver Bestrahlung junger Tiere trat eine vollständige Zerstörung der am stärksten getroffenen Partien und Veränderung des Blutbildes ein.

Das Nierengewebe scheint auch keine besondere Empfindlichkeit für Röntgenstrahlen zu besitzen, für therapeutische Dosen ist es sicher unempfindlich. Nach Bestrahlungen von Mandeldrüsen wurde Hämaturie mit folgendem Exitus, auch Bestrahlung eines großen mediastinalen Lymphsarkoms ein Harnsäureinfarkt beschrieben, jedoch ist die Strahlenschädigung als Ursache nicht sicher nachgewiesen. Erst sehr hohe Strahlendosen zeigen bei Tieren das Bild der akuten Nephritis.

Die Brustdrüse weist eine ziemliche Strahlenempfindlichkeit nur im Stadium der Entwicklung und bei Tieren zu Beginn der Trächtigkeit auf. Bei Bestrahlungen einer Bronchialdrüsentuberkulose in zwei Fällen und eines Pleuratumors in mehreren Fällen bei 10-12 jährigen Mädchen kam es jedesmal zu einer vollkommenen Atrophie der bestrahlten Mamma. Die Dosen waren allerdings so hoch, daß dabei immer eine Hautatrophie und eine Teleangiektasie auftrat.

Die Prostata zeigt eine Zerstörung der drüsigen Elemente und in geringerem Maße eine Schrumpfung des Bindegewebes. Wegen gleichzeitiger Bestrahlung des Hodens ist die Strahlenwirkung schwer zu beurteilen.

Drüsen innerer Sekretion:

Schädigungen der Nebenniere wurden vermutet, als man Addisonähnliche Erkrankungen und Blutdrucksenkungen nach Bestrahlung eines Pankreascarcinoms und nach Bestrahlung des ganzen Hypochondriums bei Rektumcarcinom mit Lebermetastasen beobachtete. Stephan erklärte diese Vorgänge durch degenerative Veränderungen des Rindenparenchyms und auch Holfelder und Peiper führen sie auf eine Schwächung der Rindenfunktion durch die Bestrahlung zurück. Ganz geklärt ist aber der schädigende Einfluß auf die Nebenniere noch keineswegs, zumal da ganz allgemein bei den endokrinen Drüsen sich die Funktionsänderungen nur sehr schlecht nachweisen lassen.

Die Radiosensibilität der Schilddrüse ist ein umstrittenes Problem. Todesfälle nach Bestrahlungen von Basedow und auch Übergang in Myxoedem sind beschrieben worden. Beim Tier konnte man einen Hyperthyreoidismus mit nachfolgendem Tod nach Bestrahlungen feststellen.

Strahleneinwirkung auf die Hypophyse bewirkte bei Frauen, die sich im Klimakterium befanden, eine Veränderung der Sympathikusinnervation, doch sind auch hier noch keine abschließenden Untersuchungen vorhanden.

Die Thymusdrüse ist, solange sie sich in Funktion befindet, ein sehr strahlenempfindliches Organ. Nach Bestrahlung tritt eine Schrumpfung ein und zwar durch den Zerfall der zwischengelagerten Zellelemente, dann durch die Degeneration der Reticulumzellen. Von Zellen, die die Bestrahlung überdauern, kann eine Regeneration ausgehen, die innerhalb von 4 Wochen beendigt sein kann.

Schädigungen der Generationsorgane.

Vielleicht das wichtigste Kapitel der Strahlenschädigungen ist die Frage nach den Strahlenwirkungen auf die Generationsorgane. Dieses Problem ist noch sehr umstritten und kann leider heute noch keineswegs als gelöst gelten.

Da die Versuche, die mit Röntgen- und Radiumstrahlen gemacht wurden, eng zusammenhängen und auf einander aufgebaut sind, die Schädigungen sich auch im wesentlichen nur quantitativ unterscheiden, will ich Röntgen- und Radiumschädigungen hier zusammen behandeln.

Die ersten grundlegenden Experimente machten Oskar, Günther und Paula Hertwig im Jahre 1912 mit den reifen Geschlechtsprodukten des Frosches. Es ergaben sich schwerste Störungen an den befruchteten Eiern nach Radiumbestrahlungen. Die gleichen Schädigungen traten jedoch auch auf, wenn sie sowohl Eier, wie Sperma einzeln bestrahlten und dann erst die Befruchtung vornahmen. Meist erfolgte bereits im Keimblasenstadium der Zerfall des Eies. Prinzi-

piell die gleichen Schädigungen, nur in abgeschwächter Form, wurden beobachtet, wenn bestrahlte Eier mit unbestrahlten Spermatozoen und unbestrahlte Eier mit bestrahlten Spermatozoen befruchtet wurden.

a) Schädigungen an den männlichen Keimdrüsen und Keimzellen.

Bei den Versuchen von O., G. und P. Hertwig wurde der geschädigte Samen unmittelbar nach der Bestrahlung zur Befruchtung verwandt (Frühbefruchtung). Außerdem muß man, wenn aus diesem Experiment Schlüsse gezogen werden sollen, bedenken, daß sie an isolierten Zellen des Kaltblüters gemacht wurden.

Die Versuche von Snyder an Rattenhoden mit Röntgenstrahlen ergaben nach vorübergehendem Erhaltenbleiben der Fruchtbarkeit eine Sterilitätsperiode. Dann trat wieder volle Fruchtbarkeit ein und trotz Inzucht wurden nur gesunde Nachkommen durch sechs Generationen gezeugt.

Auch Mutationen können durch Röntgen- und Radiumbestrahlungen hervorgerufen werden, wie zahlreiche Versuche aus jüngster Zeit an Drosophilastämmen zeigten.

Bergonié und Tribondeau fanden, daß die Strahlenwirkung sich zunächst auf die Samenbildungszellen und erst in zweiter Linie auf den Stützapparat (Sertolizellen, Zwischengewebe, Blutgefäße und Bindegewebe) erstreckte. Dabei blieb der sexuelle Trieb der Tiere trotz Zerstörung der samenbildenden Zellen im Gegensatz zur Kastration erhalten.

Die Hoden zeigen bei stärkerer Bestrahlung nach wenigen Stunden schon kaum noch Mitosen in dem sonst so mitosenreichen Epithel der Tubuli. Durch Zytolyse gehen der Reihe nach Spermatogonien, Spermatozyten und Spermatiden zu Grunde. Eine vollkommene Sterilisation tritt aber nur bei völliger Atrophie sämtlicher Hodenkanälchen auf. Nach wiederholten Bestrahlungen sind die Schädigungen natürlich noch viel weitgehender.

Eine Schädigung der Nachkommenschaft ist nach dem größten Teil der tierexperimentellen Untersuchungen bei einer Befruchtung unmittelbar nach der Bestrahlung des Genitales (Frühbefruchtung) nicht zu erwarten. Entweder konnten reife Früchte überhaupt nicht erziehlt werden oder es waren keine Schädigungen bis in die 6. Generation wahrzunehmen (Versuch an Säugetieren nach Dyroff und anderen Autoren).

Bei einer Befruchtung nach Ablauf einer Sterilitätsperiode (Spätbefruchtung) konnte durch zahlreiche Versuche an Säugetieren auch kein Anhaltspunkt für eine Schädigung der Nachkommenschaft gefunden werden.

Beim Menschen war es durch zahlreiche Beobachtungen möglich festzustellen, daß auf eine durch Strahlenwirkung entstandene Sterilität, die mit abnormen Formen von Spermatozoen einherging, nach Aufhören dieser Schädigung mehr und mehr den normalen Spermatozoen gleichende Samenzellen auftraten, durch die schließlich eine Befruchtung und eine gesunde Nachkommenschaft erzielt wurde.

Seynsche veröffentlicht dagegen auch 2 Fälle, wo von 2 Vätern, die 4 bezw. 16 Jahre in Röntgenlaboratorien tätig waren, mongoloide bezw. imbecille Nachkommen erzeugt wurden. Der exakte Beweis für eine Röntgenschädigung konnte hier jedoch nicht erbracht werden.

Trotzdem müssen wir mit der Möglichkeit einer Schädigung des menschlichen Spermas bei erhaltener Befruchtungsfähigkeit rechnen.

b) Schädigungen an den weiblichen Keimdrüsen und Keimzellen.

Bei den Ovarien treten im Gegensatz zu den Keimdrüsen des Mannes deutliche somatische Veränderungen auf, die denen des physiologischen Klimakteriums vollkommen gleichen. Histologisch steht die Atrophie mit Degeneration an den Primärfollikeln und Ureiern im Vordergrund. Die reifen Follikel sind wie die fertigen Spermatozoen relativ wenig strahlenempfindlich. Vollständige Vernichtung der Ovulation und Konzeptionsfähigkeit mit Atrophie des Genitaltraktes tritt erst nach höheren Dosen ein. Bestrahlungen zum Zweck der Kastration bei Frauen unter 40 Jahren können zu schweren Ausfallserscheinungen, die sich besonders in maniakalischen Aufregungszuständen äußern, führen. Bei verschont gebliebenen Primärfollikel kann aber von dort eine Regeneration ihren Ausgang nehmen und zur vollkommen normalen Funktion wieder führen.

Die Strahlenschädigung dürfte wohl unmittelbar nach der Bestrahlung eintreten. Wenn nicht sofort der Nachweis der Schädigung erbracht werden kann, so liegt das im wesentlichen an der Latenz.

Nach den Versuchen von Drießen, Martius und Franken können wir die Möglichkeit einer Schädigung durch Frühbefruchtung nicht abstreiten. Nach Ablauf einer Sterilitätsperiode, also nach Spätbefruchtung ergab jedoch die Mehrzahl der Tierexperimente die Unversehrtheit von Ei und Erbmasse.

Auch bei Beobachtungen an der Frau halten wir zweckmäßigerweise an dem Unterschied zwischen Früh- und Spätbefruchtung fest.

P. Werner kommt auf Grund zahlreicher klinischer Beobachtungen zu dem Schluß, daß die vorausgegangene Strahlenbehandlung der Mütter an den Kindern schwere Schädigungen erzeugt habe. Flaskamp weist jedoch darauf hin, daß bei einer großen Zahl dieser Fälle die Möglichkeit einer Frühbefruchtung bestand.

Gummert — Seynsche berichtet über eine ausgesprochene Spätbefruchtung, wo das Kind einen mongoloiden Typus aufwies; es konnte jedoch auch hier nicht der exakte Nachweis einer Strahlenschädigung erbracht werden. Solange dies aber nicht wenigstens bei einer Spätbefruchtung geschehen kann, wird es erlaubt sein, eine Bestrahlungstechnik anzuwenden, die eine temporäre Sterilisierung bezweckt. Auf diesen Standpunkt stellten sich eine ganze Reihe von Forschern auf zwei Tagungen in Düsseldorf und München 1926 und 1927.

Fruchtschädigungen.

Um die Strahlenwirkung auf das im Uterus heranreifende Ei zu prüfen, wurden in Anbetracht der Wichtigkeit dieser Frage bereits eine große Menge tierexperimenteller Untersuchungen gemacht. Es wurden dabei Störungen der Nidation, Verlängerung der Tragzeit und Wachstumsstörungen beobachtet. Bestrahlungen im ersten Teil der Schwangerschaft konnten zu intrauterinem Fruchttod mit völliger Resorption der Foeten, Bestrahlungen im letzten Viertel der Gravidität zum Abort toter oder nicht lebensfähiger Früchte führen.

Nach Untersuchungen Drießens besteht eine direkte Abhängigkeit der Strahlenschädigung von der Größe der Dosis. Das Ovarium ist weniger strahlenempfindlich als die Frucht, das Corpus luteum zeigt nur Veränderungen bei ganz starker Bestrahlung, während die mütterliche Placenta vollständig unverändert bleibt.

Auf Grund der Ergebnisse im Tierexperiment wurde auch bei der Frau versucht durch Röntgenstrahlen einen Abort künstlich herbeizuführen. Es liegt bereits eine große Reihe von erfolgreichen Berichten durch eine erhebliche Anzahl von Autoren vor. Ganzoni und Widmer konnten in 29 von 34 Fällen Aborte mit gleichzeitiger Sterilisation durch Bestrahlungen mit 50—60% der HED. herbeiführen. Für die Praxis ist das Verfahren jedoch nicht zu empfehlen.

Durch unbeabsichtigte direkte Bestrahlungen des schwangeren Uterus der Frau konnten auch mehrfach Beobachtungen der Schädigungen an ausgetragenen Kindern gemacht werden. (direkte Fruchtschädigung).

Aschenheim berichtet über einen imbecillen Mikrocephalen mit schweren Schädigungen der Augen nach Myombestrahlungen; Stettner über ein Kind, das nach 2¼ jähriger Beobachtung schwere Veränderungen an Augen, Ohren und Genitale, Intelligenzdefekte und Wachstumshemmung nach Bestrahlung eines Myoms aufwies; Flatau über ein lebendes Kind mit sogenanntem Aztekentypus nach Bestrahlung eines graviden Uterus im 2. Monat; Naujoks über ein Kind mit proportioniertem Zwergwuchs, hochgradiger Mikrocephalie mit beinahe völligem Stillstand des Hirnwachstums nach Bestrahlung

eines operierten Ovarialsarkoms (ein später geborenes Kind ist jedoch vollkommen gesund!); Abels über eine Mikrocephalie mit Veränderungen an Augen, Penis und Knochen nach Bestrahlung eines Myoms; Deutsch über eine Mikrocephalie und Mikrophthalmie; Zimmermann über ein Kind, das nach dreimaliger Behandlung der Mutter mit Mesothorium (jedesmal 100 mg intracervical und 50 mg vor die Portio) bis zum 7. Jahr keine Abnormitäten erkennen ließ, bei dem jedoch nach Versagen in der Schule eine relative Kleinheit des Schädels und Schwachsinn festgestellt wurde.

Es sind außerdem noch eine große Anzahl von Berichten mit ähnlichen Befunden vorhanden, wobei ebenfalls fast immer die schwere Schädigung des Zentralnervensystems im Vordergrund steht.

Andererseits liegt jedoch auch eine bedeutende Anzahl von Berichten vor, nach denen trotz relativ hoher Strahlendosen normale Früchte geboren wurden.

Die Strahlenempfindlichkeit scheint mit zunehmendem Alter der Frucht abzunehmen.

Ähnliche Schädigungen wie bei der direkten Bestrahlung des graviden Uterus können jedoch nach mehrfachen eindeutigen Beobachtungen auch auftreten, wenn bei Bestrahlungen einer schwangeren Frau der kindliche Körper von Strahlen überhaupt nicht getroffen wurde (indirekte Fruchtschädigung).

So berichten Bailey und Bagg über ein 14 Tage nach der Geburt gestorbenes Kind mit Spina bifida und Klumpfüßen nach Röntgen- und Radiumbestrahlungen eines Glioms des Rückenmarks, ferner über ein nach wenigen Stunden totes Kind mit einer Hemmung der Kopfentwicklung nach Röntgenbestrahlungen eines Hodkin disease. Ein weiterer Fall wurde nach einer Bestrahlung bei Paget'scher Krankheit der Brustdrüse beobachtet, wo nach Abdeckung aller übrigen Körperregionen mit Blei am Kinde 3 Monate nach der Geburt eine Mikrocephalie, Hydrocephalus und schwere Mißbildungen der Augen festgestellt wurden.

Die Ursachen dieser Störungen sind wohl in dem Zusammenwirken mehrerer Faktoren zu suchen. Eine große Rolle spielen dabei die Veränderungen von Blut und Lymphe, Schädigungen des Stoffwechsels und der endokrinen Organe, sowie die durch Blutkörperchen- und Gewebszerfall entstehenden Toxine.

Wie bei der direkten Schädigung der Frucht scheint auch hier die Strahlenempfindlichkeit mit zunehmendem Alter der Frucht abzunehmen.

Da somit die Möglichkeit einer direkten wie indirekten Fruchtschädigung ohne jeden Zweifel besteht, ist die Bestrahlung der schwangeren Frau selbst mit kleinen Dosen, wenn irgend möglich, zu unterlassen.

Durch diagnostische Strahlenanwendungen während der Gravidität wurde bis jetzt noch keine Schädigung beobachtet. Vorsicht

ist jedoch auch hier geboten, da bereits Dosen von 50 — 60 r für den Foetus gefährlich werden können und die Gefahrengrenze schon bei etwa 4 Aufnahmen liegt (Wintz).

b) Allgemein-Schädigungen.

Neben den lokalen Schädigungen kommt es infolge der großen Tiefenwirkung der Röntgenstrahlen sehr oft zu Allgemeinschädigungen.

Beim Röntgenpersonal sind diese durch die geringe, aber dauernde Einwirkung der Sekundärstrahlung und zwar der Streustrahlung bedingt.

Die ersten Symptome bestehen in einer allgemeinen Mattigkeit und nervösen Unlustgefühlen. Organisch zeigen sich besonders Veränderungen an den blutbildenden Organen und dem Bulte selbst.

Eine größere Strahlenempfindlichkeit muß dabei sowohl bei den weißen wie bei den roten Blutkörperchen den Stammzellen zugesprochen werden, wobei den Stammzellen der Erythrozytenreihe wieder eine wesentlich geringere Strahlenempfindlichkeit zukommt als der Reihe der weißen Blutkörperchen; bei großen Strahlendosen gehen jedoch auch sie zu Grunde.

1. Schädigungen am blutbildenden Gewebe.

In den Follikeln der Milz zeigen sich nach Röntgenbestrahlungen stürmische Reaktionserscheinungen schon bei Bruchteilen einer Hautdosis. Fast explosionsartig zerfallen die Lymphozyten und zwar zuerst die Kerne, wodurch eine schon makroskopisch sichtbare Verkleinerung des Organs bedingt ist. Eine Vermehrung der Phagozyten und eine beschleunigte Gerinnungszeit des Blutes wurde daneben auch beobachtet. Erheblich später, nach einigen Tagen erst, beginnt dann die Pulpa an Zellen zu verarmen. Die bald einsetzende Regeneration kann in 4 — 6 Wochen zu einer Restitutio ad integrum führen.

Bei den Lymphdrüsen bemerken wir auch den starken Lymphozytenzerfall schon nach relativ kleinen Dosen und die nach einigen Tagen auftretenden Regenerationserscheinungen.

Das Parenchym der Thymusdrüse zeigt ebenfalls einen Zerfall und baldige Regeneration.

Die weißen Zellen des Knochenmarks sind etwas weniger strahlenempfindlich als die Milzfollikel, zeigen aber ähnliche Erscheinungen. Der Reihenfolge nach gehen die Lymphozyten (schon nach 3 Stunden), die eosinophilen Zellen und die Mastzellen zu Grunde. Am längsten widerstehen die neutrophilen Zellen.

2. Schädigungen des Blutes.

Nach den Stammzellen der weißen Blutkörperchen sind die normalen und pathologischen Formen sowohl der Leukozyten als auch

der Lymphozyten die strahlenempfindlichsten Zellen des menschlichen Organismus. Bei kleinen Dosen und schon kurze Zeit nach der Bestrahlung gehen sie zu Grunde. Dabei sind wieder die Lymphozyten empfindlicher als die polymorphkernigen Zellen. Die durchschnittliche Strahlenempfindlichkeit besonders bei Lymphozyten ist jedoch bei den einzelnen Menschen sehr verschieden.

Die größte Strahlenresistenz haben die Erythrozyten.

Im strömenden Blut können wir nach der Bestrahlung oft zunächst eine Leukozytose feststellen. Vielleicht ist dies durch eine Leukozytenausschwemmung im Knochenmark zu erklären. Da dort aber gleichzeitig die Jugendformen zerstört wurden, ist die Neuproduktion von Leukozyten erschwert und es tritt dann eine Leukopenie auf, wobei auch Monozyten im Blutbild vorkommen. 6 — 7 Tage nach der Bestrahlung kann das Blutbild bereits wieder normal sein. Bei sehr hohen Dosen wurde ein Abfall des Hämoglobinwertes und eine Verminderung der Zahl der Erythrozyten und Thrombozyten festgestellt.

Besondere Bedeutung erhalten die Blutveränderungen bei den beruflich mit Strahlen Beschäftigten. Die dabei auftretenden chronischen Blutveränderungen äußern sich in einer Abnahme der polymorphkernigen Zellen, während die Lymphozyten meist sogar vermehrt sind. Die Lymphozytose kann dabei niemals als Röntgenschädigung angesprochen werden, sondern nur eine ausgesprochene Leukopenie (Lorenz). Siegel fand beim Röntgenpersonal im Beginne seiner Tätigkeit nur eine Steigerung der eosinophilen Zellen bei sonst normaler Zusammensetzung des Blutbildes. Seitz und Wintz haben ähnliche Beobachtungen gemacht.

In seltenen Fällen scheinen auch schwere Bluterkrankungen, die zum Tode führen können, durch langdauernde Strahlenwirkung selbst in kleinsten Dosen zu entstehen. Das klinische Bild dieser Krankheiten besitzt eine große Ähnlichkeit mit den bekannten aplastischen Blutsystemerkrankungen.

Es wurden Agranulozytosen beschrieben mit fast ausschließlicher Schädigung der Granulozyten, Aleukien mit Schädigung auch des lymphatischen und monozytären Apparates, ferner Panmyelophthisen mit Schädigung sämtlicher Knochenmarkselemente.

Auch die Blutplättchen können geschädigt sein, da Fälle von hämorrhagischer Diathese und Thrombopenie (Purpura Werlhoff) beobachtet wurden.

Die Vorgänge im strömenden Blut sind noch zum großen Teil ungeklärt. Die Veränderungen im blutbildenden Gewebe sind jedenfalls nicht die einzige Ursache. Dagegen ist es sicher, daß nicht nur die direkt getroffenen Zellen, sondern immer das ganze System beeinflußt wird.

3. Der Röntgenkater.

Der Röntgenkater ist heute noch ein sehr umstrittenes Problem. Er äußert sich in Appetitlosigkeit, Erbrechen, Kopfschmerzen, Mattigkeit, Durchfällen, Tenesmen und allgemeinem Kräfteverfall mit Gewichtsverlust. Hauptsächlich tritt er nach Bestrahlungen der Bauchorgane auf. Die subjektiven Beschwerden sind wohl durch eine dabei entstehende Vagusreizung zu erklären. Nach Gurniak ist er eine komplexe Schädigung, deren Wesen in Zelluntergang und Überschwemmung des Organismus mit Zelltrümmern und Abbauprodukten besteht. Von wesentlicher Bedeutung ist eine dabei auftretende Kochsalzverarmung des verdünnten Blutes, wie Voltz, Holzknecht und Sielmann beobachteten, sowie auch ein Absinken des Erythrozytenspiegels im Blutserum (Dietel). Nach Ingeburg bewirkt der Vagusreiz eine Veränderung beziehungsweise Herabsetzung des Bacterium Coli Prozentsatzes.

III. Schädigungen durch Strahlungen radioaktiver Substanzen.

Da, wie schon bemerkt, ein grundsätzlicher Unterschied in der Wirkung der Röntgenstrahlen und der Strahlen der radioaktiven Substanzen nicht besteht, können die Schädigungen, die durch Röntgenstrahlen bedingt sind, zum großen Teil auch durch Radium, Thorium, Mesothorium und Polonium hervorgerufen werden. Im folgenden sind daher viele Schädigungen an verschiedenen Organen, die den Röntgenstrahlenschäden entsprechen, nicht einzeln noch einmal wiederholt.

Die auftretenden klinischen Symptome sind bei den radioaktiven Stoffen durchwegs von leichterer Art, der Verlauf ist gutartiger und die Ausdehnung geringer, besonders aber hat die Allgemeinschädigung weit kleinere Ausmaße als bei den Röntgenstrahlen.

Entsprechend der rein technisch anderen Verwendungsmöglichkeit und Zweckmäßigkeit ist auch die vornehmliche Lokalisation der Schädigungen etwas anders.

Gemeinsam ist bei fast allen Organen eine starke Hyperämie; sehr oft treten auch Blutungen auf.

a) Lokale Schädigungen.

Schädigungen der Haut.

Die percutane Radiumbestrahlung wird heute nur noch wenig verwandt. Tritt aber trotzdem einmal eine akute Strahlendermatitis auf, so zeigen ihre Reaktionsgrade und Latenzzeiten nur wenig Unter-

schiede gegenüber den Röntgenstrahlen. Da jedoch die Intensität der Strahlung mit zunehmender Entfernung vom Strahler bedeutend abnimmt, ist auch die Hautreaktion an der Peripherie des Bestrahlungsfeldes erheblich schwächer als im Zentrum. Die Überhäutung beginnt im Gegensatz zu den Röntgendermatiden im Zentrum und ist in kürzerer Zeit vollendet; die Schädigungen sind nicht so ausgedehnt und bleiben mehr auf die Oberfläche beschränkt.

Die chronische Radiumdermatitis ist nur als Gewerbekrankheit bekannt und tritt besonders an den Fingerspitzen, mit denen die Präparate angefaßt werden, auf. Früher, als noch kaum mit Schutzvorrichtungen gearbeitet wurde, war sie recht häufig; heute wird sie jedoch kaum mehr beobachtet.

Das Carcinom entsteht viel seltener auf dem Boden einer chronischen Radiumdermatitis als auf dem Boden einer Röntgendermatitis.

Dagegen ist das Radiumexanthem bedeutend häufiger als das Röntgenexanthem. 24 — 36 Stunden oder 8 — 12 Tage nach der Bestrahlung macht es sich meist durch heftiges Jucken bemerkbar. Es ist ein rotes maculöses Exanthem, das durch Konfluieren papulöse und pustulöse Effloreszenzen bildet, anfangs auf den Bestrahlungsherd beschränkt ist, später sich aber auf den ganzen Körper ausbreiten kann. Nach 2 — 7 Tagen ist es wieder abgeheilt.

Bisweilen kommt es nach Radiumbestrahlungen auch zu urticariaähnlichen Ausschlägen oder zu einem Erythema fugax, das sich universell ausbreiten kann.

Schädigungen der Schleimhäute.

Im Gegensatz zu den Röntgenstrahlen sind es meist die Schleimhäute, die primär von den Strahlungen der radioaktiven Substanzen getroffen werden.

In der Mundhöhle tritt am strahlenempfindlichen weichen Gaumen Epithelschwund ein, während der weniger strahlenempfindliche harte Gaumen bei hohen Strahlendosen eine Degeneration mit beschleunigter Verhornung aufweist. Gros berichtet über einen Fall, wo ausgedehnte Nekrosen nach Krebsbestrahlungen im Mundboden und an der Zunge auftraten.

In erster Linie sind auch die ganzen Schädigungen, die in der Gynäkologie auftreten, Schleimhautschädigungen. Entsprechend der hauptsächlichen Verwendung der radioaktiven Substanzen auf diesem Gebiet sind auch die auftretenden Schädigungen hier am zahlreichsten.

Die Reaktion ist ungefähr dieselbe wie bei der Haut, nur sieht man an Stelle von Blasenbildungen mehr einen oberflächlichen Substanzverlust. Da diese Dermatitis jedoch nicht wie bei der Haut vom Patienten direkt bemerkt wird, in den leichteren Fällen auch kaum

Beschwerden verursacht — schwere Fälle gehen allerdings mit großen Schmerzen einher —, wird sie leicht übersehen.

Einlagerungen werden sowohl in die Vagina, wie in die Cervix und in den Uterus, sehr selten auch ins Rectum gemacht.

Besonders geschädigt wird das hintere Scheidengewölbe, die medianen Partien der vorderen und hinteren Scheidenwand und die Wülste der columnae rugarum. Auch die Portio und der Cervixkanal weist charakteristische Schädigungen auf. Die Abheilung benötigt längere Zeit, doch ist die Prognose relativ günstig.

Im Anfang der Radiotherapie konnte man jedoch häufig beobachten, wie die Entzündung immer weiter um sich griff und schwere Schädigungen auch an den benachbarten Organen auftraten. Schwere Verbrennungen mit Sklerose der Vaginalwände, mit Stenosen, Verwachsungen und Obliterationen derselben, schließlich Übergreifen auf das paravaginale, vesicovaginale und vaginorectale Gewebe, ja sogar auf das Peritoneum wurden beobachtet. Nekrose der Parametrien und Arrosion der Arteria uterina kamen vor. Fistelbildungen zwischen Blase und Scheide, sowie zwischen Scheide und Mastdarm waren nicht selten; besonders verhängnisvoll waren aber Fistelbildungen im Douglas und Ureterenfisteln, wodurch Peritonitis und Darmnekrose auftreten konnte.

Ursache war meist eine Überdosierung besonders durch Außerachtlassung der Kumulationswirkung (6 Wochen sollen zwischen zwei Bestrahlungen liegen!) gerade bei der mit Röntgenstrahlen kombinierten Behandlung.

Aber auch bei einwandfreier Technik kommen Schädigungen dieser Art vor. So berichtet Bugbee aus der jüngsten Vergangenheit über einen Fall, wo nach intracervicaler Radiumbehandlung ein Ureterenverschluß auftrat.

Pelveo-peritonitiden oder sogar allgemeine Peritonitiden, die durch die sogenannte „Stempelspritzwirkung" nach gewaltsamer Einschiebung der radioaktiven Stoffe in das Uteruscavum mit nachfolgender fester Tamponade entstanden, führten zum vollkommenen Verlassen der intracervicalen und intrauterinen Einlagerungen durch manche Strahlentherapeuten, zumal da selbst Infektionen durch die Radiumeinlagen in die Cervix vorkamen.

Diese ganzen Schädigungen sieht man heute in bedeutend geringerer Zahl auftreten. Allerdings muß man, besonders bei postoperativer Einlagerung von radioaktiven Stoffen, sehr vorsichtig sein! Die Scheidenschleimhaut verträgt zwar sehr hohe Dosen, doch ist gerade dann die Strahlenempfindlichkeit der benachbarten Organe wesentlich erhöht.

So beobachtete man schon schwere Zerstörungen am Darm, besonders am Rectum, nach Uterusextirpation bei sonst vollkommen unschädlichen Dosen.

In den Jahren 1926 — 1932 traten von 375 Collumcarcinomen in der Universitätsfrauenklinik Königsberg 48 Schädigungen des Rectums wenige Tage bis 2 ½ Jahre nach der Bestrahlung auf.

Radiumbestrahlungen an der Oesophagusschleimhaut kann bei Carcinomen mit tiefer Lokalisation zum Durchbruch des Oesophagus nach dem Mediastinum führen.

Schädigungen an der Muskulatur.

Der Muskel kann durch sehr intensive Strahlen auch primär und zwar am Kern der Muskelfasern geschädigt werden. Die Querstreifung wird geringer und ein Schwund einzelner Muskelzellen macht sich bemerkbar.

Auf Umwandlung der Muskulatur der unteren Uterinsegmente führt es Kane auch zurück, daß nach intrauteriner Radiumbehandlung in gebärfähigem Alter fünf mal bei 6 Fällen Kinder nicht lebensfähig entwickelt werden konnten, wobei immer Lebensgefahr für die Mutter bestand.

Schädigungen am Auge.

Nach Radiumbestrahlungen können am Auge eine Blepharitis, Conjunctivitis und Keratitis auftreten. Experimentell wurden schon Katarakte, Degenerationen der Netzhautganglienzellen und des Sehnerven erzeugt. Langdauernde Radiumwirkung in der Kieferhöhle kann Nekrose der Orbita und des Bulbus verursachen.

Nach Bestrahlungen mit Mesothorium wurde beim Kaninchen Nekrose der Lidbindehaut, Abhebung und interstitielle Entzündung der Haut festgestellt.

Thorium X verursacht nach Einspritzung in die Vorderkammer des Kaninchenauges parenchymatöse Trübung der Hornhaut, Entzündung und Entfärbung der Iris.

Schädigungen am Ohr.

Bei Tauben wurden am Ohr nach Radiumbestrahlungen Gleichgewichtsstörungen festgestellt.

Schädigungen an den Drüsen.

An den Nebennieren bemerken wir bei Tieren nach kleinen Dosen eine Verstärkung der Chromierung, die ja bekanntlich als Maß des Adrenalingehaltes betrachtet wird, nach großen letalen Dosen fast vollkommenen Schwund der Chromierung neben einer starken Verminderung des Lipoidgehaltes der Rindenschicht.

Am leichtesten erleiden vom Drüsengewebe wie bei den Röntgenstrahlen die Keimdrüsen in ihrer Funktion eine Schädigung.

Die Radiumschädigungen der Generationsorgane sind mit den Röntgenstrahlenschädigungen zusammen behandelt.

b) Allgemein-Schädigungen.

Die Allgemeinschädigungen entsprechen im großen und ganzen den bei den Röntgenstrahlen beschriebenen Veränderungen, zeichnen sich jedoch durch einen harmloseren und milderen Verlauf aus. Ein charakteristisches Symptom ist der metallische Geschmack.

Die Veränderungen am blutbildenden Gewebe, wie an den Blutkörperchen selbst, entsprechen im wesentlichen den bei der Röntgenbestrahlung auftretenden Schädigungen. Ebenso sind die Unterschiede in den chronischen Blutveränderungen der beruflich mit radioaktiven Stoffen Beschäftigten gegenüber den Röntgenologen und dem übrigen Röntgenpersonal nur quantitativer Art.

Aber auch schwere Strahlenschädigungen, sogar mit Todesfolge, können durch radioaktive Stoffe hervorgerufen werden, wie die Berichte von Hoffmann und Martland aus einer amerikanischen Fabrik für leuchtende Ziffern und sogenannte Radiouhren beweisen. Die jungen Arbeiterinnen spitzten mit den Lippen ihre Pinsel, mit denen sie die Zeiger und Zahlen mit Zinkpyrosulfid unter Zumischung von Radium und Mesothorium bemalten. In der ersten Serie von 12 Fällen wurden schwere Kiefernekrosen, ähnlich den Phosphornekrosen, festgestellt. Einige dieser Arbeiterinnen, von denen Befunde bei Lebzeiten vorlagen, hatten aplastische Anämien.

Genaue Untersuchungen von Martland, Knef und Coulon ergaben dann die verschiedensten Blutschädigungen, schwerste Veränderungen der hämatopoetischen Organe und auch in einem Falle das Auftreten von vielen jugendlichen Leuko- oder Myeloblasten mit hämorrhagischer Diathese und Anämie. In einigen Fällen wurden auch Megalozytosen festgestellt.

Bezüglich Herz, Kreislauf und Atmung finden sich nach Behandlung mit radioaktiven Stoffen sehr widersprechende Angaben.

Die Blutgerinnung scheint bei kleinen Dosen herabgesetzt zu sein.

Ein wesentlicher Einfluß auf fermentative Prozesse wird heute im Gegensatz zu früher nicht mehr angenommen.

Nach Untersuchungen am Menschen von Kikkoji ist die Harnsäureausscheidung, Gesamtstickstoffausscheidung, Kohlensäureausscheidung, sowie die Sauerstoffaufnahme erhöht.

Durch Injektionen von sehr kleinen Dosen (1/1000 mg gelöste Radiumsalze oder Thorium X) entsteht beim Menschen für etwa einen Tag eine Leukozytose (bis etwa 20000 Leukozyten pro 1 mm^3).

Große intravenös verabreichte Dosen können nach anfänglicher Leukozytose unter fortschreitendem Leukozytenschwund, Fieber, Blutbrechen und blutigen Stühlen zum Tode führen. Gundzent und Orth berichten über einen Fall aus der ersten Zeit der Thorium X-An-

wendung: Nach Injektion von 5 — 15 Millionen Mache-Einheiten, was etwa der tödlichen Dosis am Menschen entspricht, trat bei einer jungen Frau innerhalb eines Monats der Tod ein. Derartige akute Krankheitsbilder sind beim Menschen heute aber als Folge der Therapie wohl nicht mehr zu beobachten.

Nephrosen, Nephritiden, hämorrhagische Diathesen, Ikterus und Zucker, sowie auch Gewichtsabnahmen wurden nach Bestrahlungen schon beschrieben.

Bei Diabetes wurde teils von Besserung, in zahlreichen Fällen aber auch von Verschlechterung berichtet.

Der Radiumkater, der nach Bestrahlung in 3 — 5 % auftritt, geht mit bedeutend geringeren Beschwerden einher, als der Röntgenkater.

Strahlenschutz.

I. Schutzmaßnahmen gegen die Lichtstrahlen.

Da die Penetrationskraft der Lichtstrahlen im Vergleich zu den Röntgenstrahlen und den Strahlungen der radioaktiven Stoffe nur relativ gering ist, kann man sie auch verhältnismäßig leicht abschirmen.

Der Körper selbst schützt sich durch die Melaninbildung, wodurch die ultravioletten Strahlen absorbiert und in Wärme umgewandelt werden. Jesonek schreibt dem Melanin allerdings nur den Lichttransport von der Oberfläche in die Tiefe zu.

Das Melanin ist ein Abkömmling des Tyrosins und mit dem Adrenalin der Nebenniere chemisch verwandt. Es wandelt sich durch die ultravioletten Strahlen von 265—313 μμ (Maximum zwischen 297 und 303 μμ) in das braune Hautpigment um. Wahrscheinlich geschieht dies durch eine Reizung der Sympathikusendigungen, wodurch die Adrenalinerzeugung vermindert und die Melaninbildung erhöht wird.

Das Melanin hindert aber auch die ultraroten Strahlen vor weiterem Eindringen in den Organismus, obwohl diese ebenso wie die sichtbaren Lichtstrahlen ja schon an der Körperoberfläche bedeutend mehr als die ultravioletten Strahlen reflektiert werden.

Die vermehrte Bildung von braunem Hauptpigment geht bei der weißen Rasse sehr langsam vor sich, kann aber durch vorsichtige Gewöhnung an die Sonnenbestrahlung auch ohne Erythem am ganzen Körper erreicht werden. Dabei werden dunkelhaarige Menschen viel

früher braun als hellblonde, die oft überhaupt kein Pigment bilden können. Diese Unfähigkeit der Pigmentbildung finden wir auch bei den Mongolen und den westeuropäischen Juden.

Ein natürlicher Schutz gegen die Einwirkungen der Sonnenstrahlen ist auch das Kopfhaar, das bei den Negern durch die große Dichte, die durch Kräuselung noch vermehrt ist, selbst die Tropensonne abzuhalten vermag.

Am meisten bietet uns jedoch Schutz gegen die Sonnenbestrahlung die Kleidung, durch die hindurch aber bei zu leichtem Gewebe auch noch Sonnebrand entstehen kann. In den Tropen werden besonders weiße Stoffe getragen, die innen rot oder schwarz gefüttert sind. Kopf, Gesicht und Nacken schützt der Tropenhelm.

Bei Sonnen- oder künstlichen Lichtbädern, wo sonst von Kleidung bedeckte Körperteile der Belichtung ausgesetzt sind, schützen wir die Haut durch Salben und Öle, die Extrakte der Roßkastanie, Chinin, Cumarin und ähnliche Substanzen enthalten. Hitzschlag und Sonnenstich können wir durch eine leichte Kopfbedeckung verhüten. Die erste Vorbedingung, um Schädigungen zu vermeiden, ist natürlich eine langsam steigende Dosierung mit entsprechenden Pausen.

Bei Verwendung von Quecksilberlampen und Kohlenbogenlampen ist ab und zu eine Kontrolle der ausgesandten Wellenlängen nötig, da sich diese wie bei den Röntgenröhren verändern können.

Einen großen Schutz gegen die Lichtstrahlen überhaupt, besonders aber gegen die ultravioletten Strahlen, bietet uns das gewöhnliche Fensterglas. Es läßt nämlich überhaupt keine Strahlen unter 313 μμ Wellenlänge durch und schwächt auch die längeren weitgehend ab.

Für den Schutz der für Lichtstrahlen so sehr empfindlichen Augen ist dies von großer Wichtigkeit, da demnach schon eine gewöhnliche Glasbrille die ultravioletten Strahlen abzuhalten vermag. Lösungen von Äsculin, Cocadrenalin, Corodenin und Colural haben ähnliche Wirkungen.

Um auch ultrarote Strahlen vom Auge vollkommen abzuhalten, müssen dunkel gefärbte Gläser verwendet werden, z. B. gelbe Eisenoxydgläser, Uropunktalgläser (Zeiß) oder neodymhaltige Neophangläser (Auer). Die Triplexgläser mit Äsculinzwischenschicht bieten außer der Absorption noch Schutz durch Reflexion an einer dünnen Metallschicht.

Vor Grelleschäden beim Betrachten der Sonne zum Beispiel bei Sonnenfinsternissen schützt man sich durch geschwärzte oder dunkel gefärbte Gläser.

II. Schutzmaßnahmen gegen die Röntgenstrahlen.

Entsprechend der Häufigkeit und der Schwere der Schädigungen, die durch Röntgenstrahlen verursacht werden, müssen alle Personen, die mit diesen Strahlen irgendwie in Berührung kommen, besonders sorgfältig geschützt werden.

Die hier in Betracht kommenden gesetzlichen Vorschriften sind in den DIN Rönt 2/1933 festgelegt.

Wir unterscheiden direkte und indirekte Schutzmaßnahmen.

A. Direkte Schutzmaßnahmen.

1. Für die Ärzte und das Personal.

Meist verwendet man zum direkten Schutz Blei. Da jedoch dieses selbst als Oxyd giftig ist, versieht man es mit einem Anstrich oder verkleidet es.

Die Sekundendosis soll an keiner Stelle des Röntgenraumes, an der sich üblicherweise Personen aufhalten können, im Diagnostikbetrieb $2{,}5 \cdot 10^{-5}$ r, im Therapiebetrieb $1 \cdot 10^{-5}$ r überschreiten.

a) Schutzmaßnahmen bei der Röntgenuntersuchung.

Bei Durchleuchtungen ist der Leuchtschirm, der ringsum mit Schutzflächen umgeben werden soll, mit einer Bleiglasplatte abzudecken, deren gleichwertige Bleidicke bis 75 kV mindestens 1 mm, bis 125 kV mindestens 2 mm beträgt. Hierbei soll durch entsprechende Ausblendung des Nutzstrahlenbündels erreicht werden, daß das Primärstrahlenbündel vom Bleiglas voll aufgefangen wird.

Für Röntgenaufnahmen gelten die gleichen Bleiäquivalente.

Die in jeder Richtung durchgelassene Strahlung darf in mehr als 30 cm Focusabstand außerhalb des Nutzstrahlenkegels höchstens so stark wie die im gleichen Focusabstand gemessene durch die oben erwähnte Bleidicke geschwächte Nutzstrahlung sein.

Die Strahlenintensität und die Blendenöffnung soll möglichst klein, die Durchleuchtungszeit möglichst kurz sein.

Der Streustrahlenschutz, der möglichst bis zum Boden gehen soll, wird durch eine gleichwertige Bleidicke von 1 mm gewährleistet.

Wenn der Schalttisch sich im Untersuchungsraum befindet, so muß ein Schutzschirm mit Seitenflügeln von mindestens 2×2 m Größe und 1 mm Bleiäquivalent vorhanden sein, der mindestens 1,5 m Abstand von der Röntgenröhre hat und möglichst nahe an der Zimmerwand aufgestellt ist. Schutzfenster müssen eine gleichwertige Bleidicke haben.

Schutzhandschuhe, die auch einen Teil des Unterarmes allseitig bedecken müssen, sollen im Bereich der direkten Strahlung mindestens 0,5 mm, zur Apalpation, die aber möglichst einzuschränken ist, mindestens 0,3 mm Bleiäquivalent haben. Die gleichwertige Bleidicke von Gummischürzen muß mindestens 0,5 mm betragen.

Es ist zweckmäßig Handschuhe und Schürzen öfters nachzuprüfen.

Wegen der Bleieigenstrahlung sollen Stoffhandschuhe unter ungefütterten Schutzhandschuhen getragen werden.

Nachbarräume sind genügend strahlensicher, wenn die der Röhrenseite eines Durchleuchtungsgerätes zugekehrte Wand mit 0,5 mm Blei versehen wird.

b) Schutzmaßnahmen bei der Röntgenbehandlung.

Wir müssen bei der Röntgenbehandlung zwischen den Röhren mit ungenügendem Schutz (Schutzart U), die heute nur noch wenig Verwendung finden, und den Röhren mit genügendem Schutz des Röhrenbehälters oder der Röhre selbst (Schutzart G) unterscheiden. Bei Röhren der Schutzart G darf die in jeder Richtung durchgelassene Strahlung in mehr als 1 m Focusabstand außerhalb des Nutzstrahlenkegels höchstens so stark sein wie die im gleichen Focusabstand gemessene Nutzstrahlung, wenn diese bei Betriebshöchstspannungen

bis 75 kV durch eine Schicht von 1 mm
bis 125 kV durch eine Schicht von 2 mm
bis 190 kV durch eine Schicht von 3 mm
bis 220 kV durch eine Schicht von 4 mm
bis 250 kV durch eine Schicht von 6 mm
bis 300 kV durch eine Schicht von 9 mm
bis 350 kV durch eine Schicht von 12 mm
bis 400 kV durch eine Schicht von 15 mm

gleichwertige Bleidicke geschwächt ist.

Im Behandlungsraum dürfen Personen nur dann beschäftigt sein, wenn die Nutzstrahlung durch die obige Menge Bleiäquivalent aufgefangen wird.

Für die Schutzart U gelten bis 125 kV die Bestimmungen für den Schalttisch wie bei der Röntgenuntersuchung, nur beträgt die gleichwertige Bleidicke mindestens 2 mm.

Über 125 kV müssen 2 getrennte Räume vorhanden sein, deren Zwischenwand in ihrer ganzen Ausdehnung mit den obigen für die Nutzstrahlung bei Röntgenbehandlung angeführten gleichwertigen Bleidicken versehen sein muß. Diese Schutzschicht soll 10 cm tief in den Boden und in die Decke eingeführt werden, wenn sie nicht in einer Breite von je 30 cm dort umgeschlagen ist. Türen müssen entsprechend weit den Rahmen überlappen.

Bei der Schutzart G können Personen im Behandlungsraum beschäftigt sein, ihre Arbeitsplätze müssen jedoch bei 125 kV in 1,5 m, über 125 kV in mindestens 2 m Abstand von der Röntgenröhre sich befinden.

Die aus dem Kranken seitlich austretende Streustrahlung ist

bis 125 kV mit 0,5 mm,
bis 190 kV mit 1,0 mm,
bis 250 kV mit 1,5 mm

Bleiäquivalent abzuschirmen.

Für die Strahlensicherheit der Ventilröhren ist natürlich auch Sorge zu tragen.

2. Für die Patienten.

Sehr wichtig ist es wegen der Kumulationswirkung der Röntgenstrahlen die Patienten vor der Bestrahlung bezw. vor der Durchleuchtung grundsätzlich zu fragen, wievielmal sie schon und wann das letzte Mal bestrahlt oder durchleuchtet worden sind.

Es wäre zweckmäßig, die Anzahl der gestatteten Durchleuchtungen und Aufnahmen festzusetzen.

Die einzelnen bestrahlten Teile dürfen, soweit sie nicht abgedeckt sind, von der Röhre nicht verschiedenen Abstand haben.

Bei kranker Haut sind die Strahlendosen entsprechend niedriger zu wählen. Von den bestrahlten Stellen sollen alle sonstigen Reize und Schädlichkeiten wie Sonne, Jod und reizende Chemikalien abgehalten werden.

Zur Schonung der äußeren Gewebe sind Bestrahlungen zentraler Herde von mehreren Stellen aus sehr zweckmäßig. Dabei sollen aber Überschneidungen von Strahlen vermieden werden.

Für Durchleuchtungen soll ein fixes Filter von 0,5 — 1 mm Aluminium vorgeschoben werden. Bei modernen Röntgenröhren ist durch automatische Schieber die Garantie gewährleistet, daß sich immer ein Filter vor der Röhre befindet. Zu empfehlen ist auch eine Filtersicherung, die ein Verwechseln von Filtern unmöglich macht.

Der Focushautabstand soll 35 cm nicht unterschreiten. Bei ortsfesten Durchleuchtungsvorrichtungen müssen dies mechanische Mittel gewährleisten, sonst ist darauf besonders zu achten.

Volt- und Amperemeter sind auf ihr tadelloses Funktionieren öfters zu prüfen. Für die Therapie sind je 2 Meßinstrumente zu verwenden.

Vorkehrungen zur dauernden Messung der ausgesandten Strahlung sind sehr zu empfehlen.

Im Interesse von Patient und Personal (Streustrahlen!) sind alle Körperstellen, die nicht von Strahlen getroffen werden sollen, in der Diagnostik mit 1 mm, in der Therapie mit 3 mm Bleiäquivalent, am

besten Bleigummi, abzudecken. Für ganz kleine Stellen kann man dazu Bariumpasta verwenden. Zum Schutze des Auges bei Bestrahlungen der Augenlider oder der näheren Umgebung des Auges werden Kontaktschalen aus Pariser Emaille oder Bleiglas verwandt.

Die Nachprüfung der gesamten Anlage von Zeit zu Zeit ist sehr zu empfehlen. Die Strahlenschutzvorrichtungen können durch den Leuchtschirm, die photographische Platte, am besten aber die Jonisationsmethode kontrolliert werden.

Trotz strengster Innehaltung aller Sicherheitsvorkehrungen ist aber eine Strahlenschädigung auch heute noch nicht völlig sicher ausschließbar.

B. Indirekte Schutzmaßnahmen.

1. Entsprechende Vorbildung.

Erste Voraussetzung zur Verhütung von Röntgenschäden sind gut vorgebildete Ärzte und ein geschultes Personal. Leider läßt in Deutschland diese Forderung noch viel zu wünschen übrig. Es wäre Sache der Behörden zu verhindern, daß jemand, ohne die entsprechende Vorbildung zu besitzen, überhaupt mit Röntgenapparaten arbeiten darf.

Häufig werden noch viel zu hohe Strahlendosen verwendet und oft fehlt gänzlich eine gut begründete Indikation zur Strahlenbehandlung. Harmlose Bestrahlungsdosen gibt es nicht und es kann nicht verantwortet werden, daß zum Beispiel durch die Bestrahlung einer gewöhnlichen Blepharitis die Gefahr eines Röntgenstares heraufbeschworen wird.

Jeder Arzt soll auch mit der technischen Ausführung einer Röntgen- oder Radiumbestrahlung vertraut sein. Holfelder sagt: „Jede Einstellung eines Bestrahlungsfeldes muß von einem spezialistisch ausgebildeten Arzt persönlich ausgeführt werden, während die technische Überwachung des Arbeitens der Röntgenröhre verantwortlich der Röntgenlaborantin überlassen werden kann... Der Arzt hat sich von der Zuverlässigkeit und Sachkenntnis seines Personals zu überzeugen."

2. Vorbeugungsmaßnahmen am Bedienungspersonal.

Die Toleranzdosis beträgt 1/100 der HED, das ist ungefähr 6 r pro Monat, pro Tag also etwa 0,2 r.

Die Arbeitszeit soll in unseren Breiten 7 Stunden pro Tag nicht überschreiten. Dies entspricht auch etwa der geforderten Dosisleistung von 10^{-5} r/sec.

In der Woche sind 2 Nachmittage frei zu geben. Diese Freizeit, sowie der Urlaub, der mindestens 1 Monat betragen soll, ist hauptsächlich in der frischen Luft bei Sport und Bewegung zu verbringen.

Jeder andere Dienst ist neben der Röntgentätigkeit untersagt, doch soll mit der Beschäftigungsart öfters gewechselt werden.

Probeaufnahmen und Probedurchleuchtungen sind nicht an Personen, die im Röntgenbetrieb beschäftigt sind, vorzunehmen, ebenso sollen diese Angestellten nicht den Film bei zahnärztlichen Aufnahmen halten.

Zweimal im Jahr hat eine allgemeine Untersuchung zu erfolgen. Beim Eintritt und fortlaufend alle zwei Monate ist der Blutbefund zu erheben und aktenmäßig festzulegen.

Die Arbeitsräume müssen trocken und sonnig sein. Eine gute Ventilation, auch am Fußboden, soll für eine stündlich zehnmalige Erneuerung der Luft und Abzug der nitrosen Gase sorgen. Das Röntgenzimmer muß wenigstens 25 qm, die Dunkelkammer 10 qm Bodenfläche bei 3,5 m lichter Höhe haben.

Jedem, auch einem nur vorübergehend im Röntgenbetrieb Beschäftigten, sind die gesetzlichen Betriebsvorschriften auszuhändigen und der Empfang unterschriftlich bestätigen zu lassen; außerdem sind diese auch auszuhängen.

Cramer berichtet von einer Rundfrage bezüglich der Blutbildschädigungen des Personals an allen großen Röntgenbetrieben, wo überall mit den vorschriftsmäßigen Schutzmaßnahmen gearbeitet wurde. Es ergab sich dabei das Fehlen jeglicher spezifischer Veränderung gegenüber den nicht radiologisch Beschäftigten.

III. Schutzmaßnahmen gegen die Strahlungen radioaktiver Substanzen.

Bei den radioaktiven Stoffen kommen neben den Gammastrahlen auch Alpha- und Betastrahlen zur Wirkung und erfordern aus diesem Grunde schon andere Schutzmaßnahmen wie die Röntgenstrahlen.

Aber auch für die Gammastrahlen sind andersartige, wesentlich stärkere Schutzvorrichtungen nötig, denn sie haben durch ihre kleine Wellenlänge eine bedeutend größere Durchdringungsfähigkeit, ihre Sekundärstrahlung ist intensiver, die Strahlung geht dauernd vor sich und ist endlich nicht gerichtet wie die Nutzstrahlung bei den Röntgenstrahlen.

Trotzdem findet eine Reihe von Röntgenschutzmaßnahmen auch hier sinngemäße Anwendung (indirekte Schutzmaßnahmen).

Die in Betracht kommenden gesetzlichen Vorschriften sind in den DIN Rönt 4/1933 festgelegt.

Leider läßt sich eine ähnliche Toleranzdosis wie bei den Röntgenstrahlen hier nicht angeben.

Alle im Radiumbetrieb verwendeten Präparate müssen durch eine von der Deutschen Röntgengesellschaft anerkannten Prüfstelle auf ihren Gehalt an radioaktiven Stoffen geprüft sein.

Radium- und Mesothoriumpräparate müssen emanations- und alphastrahlendicht verschlossen sein. Diese Dichtigkeit ist alle drei Monate nachzuprüfen.

Besonders gefährlich ist der Umgang mit radioaktiven Stoffen, bei denen die Abfilterung der Betastrahlen ungenügend ist. Die Handhabung solcher Präparate ist möglichst einzuschränken. Es ergeben sich nämlich schwere Schädigungen und zwar zunächst der Haut an den Innenflächen des Daumens, des Zeige- und Mittelfingers.

Soll nur die Gammastrahlung eines radioaktiven Präparates zur Wirkung kommen, so muß die Intensität der Betastrahlung auf mindestens 1 % ihres Ausgangswertes vermindert werden. Dies kann durch Platin- oder Gold- von mindestens 0,3 mm, Blei- von 0,5 mm, Silber- von 0,6 mm oder Messingfilter von 0,9 mm geschehen.

Da die Intensität jeder Strahlung mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt, soll bei Arbeiten mit radioaktiven Präparaten ein möglichst großer Abstand von der Strahlenquelle eingehalten werden.

Zum Anfassen der Präparate werden langstielige Zangen bezw. Pinzetten verwendet. Zweckmäßig arbeitet man auch mit Schutzhandschuhen.

Eine Beförderung radioaktiver Präparate aus dem Radiumarbeitsraum muß in einem mit 1 cm Blei allseitig ausgeschlagenen Behälter erfolgen, der zweckmäßigerweise mit 30 cm langen Tragriemen versehen ist.

Durch die Post sollen nur kleinere Quantitäten versandt werden, die dann in mit 3 mm Blei ausgeschlagenen Behältern aufzubewahren sind.

Alle Arbeiten sollen so rasch wie möglich ausgeführt werden.

Außer Gebrauch sind radioaktive Stoffe in einem Kassenschrank aufzubewahren, der innen allseitig mit einer der aufbewahrten Menge entsprechenden Bleiverkleidung ausgeschlagen sein muß.

Diese beträgt

für	0,05	Gramm Radiumelement	5,0 cm,
für	0,2	Gramm Radiumelement	8,5 cm,
für	0,5	Gramm Radiumelement	10,0 cm,
für	1,0	Gramm Radiumelement	11,5 cm,
für	2,0	Gramm Radiumelement	13,0 cm,
für	5,0	Gramm Radiumelement	15,0 cm,
für	10,0	Gramm Radiumelement	17,0 cm.

Wenn über 200 mg aufbewahrt werden, so wird empfohlen, den bleiverkleideten Innenraum in mehrere Fächer zu unterteilen, die

durch 1 cm dicke Bleischichten gegeneinander und durch eine 2 cm dicke Bleischicht nach vorn zu schützen sind.

Die Bleiverkleidung kann geringer sein, wenn die Entfernungen von den Arbeitsplätzen bezw. Nachbarräumen ziemlich groß sind.

Für 100 mg beträgt z. B. bei 3 cm Bleidicke die Mindestentfernung der Arbeitsplätze 1,5 m, der Nachbarräume 3,0 m;

für 5000 mg bei 5 cm Bleidicke beträgt sie 5,5 bezw. 12,0 m,
für 5000 mg bei 7,5 cm Bleidicke beträgt sie 3,0 bezw. 6,5 m,
für 5000 mg bei 10,0 cm Bleidicke beträgt sie 2,0 bezw. 4,0 m,
für 5000 mg bei 12,0 cm Bleidicke beträgt sie 1,0 bezw. 2,5 m.

Die genauen Vorschriften über die mindestzulässigen Abstände zwischen den Schutzbehältern und den Arbeitsplätzen bezw. Nachbarräumen für die verschiedenen Bleidicken finden sich in der Tabelle von den DIN Rönt 4/1933 § 6.

Bei Schutzbehältern an der Außenwand des Hauses kann dazwischenliegendes Mauerwerk auch in die Berechnung einbezogen werden.

Zur Vorbereitung der in Schutzkapseln eingeschlossenen Röhrchen oder Applikatoren soll ein besonderer nur während dieser Arbeit zu benützender Raum vorgesehen sein. Ebenso soll der Meßraum ein getrenntes Zimmer sein.

Um vom Körper während der Handhabung die durchdringenden Gammastrahlen abzuhalten, sind Rumpf und Beine durch einen Schutzschirm von 5 cm Bleiäquivalent, der Kopf durch eine mindestens 30 cm von der Arbeitsfläche entfernte Spiegelglasplatte zu schützen.

Alle einfachen oder in kurzer Zeit zu erlernenden Arbeiten sollen vorzugsweise durch vorübergehend (höchstens 6 Monate) Beschäftigte ausgeführt werden. Besonders gilt dies für Schwestern und die mit dem Vorbereiten der Applikatoren beschäftigten Personen.

Sonstige Leute, die im Radiumzurichtungs- oder Behandlungsraum zu tun haben, müssen sich mindestens in 2 m Abstand von den radioaktiven Präparaten aufhalten.

Bei Radiummengen über ½ g sollen sich Schwestern und Hilfskräfte nicht im gleichen Raum befinden, wie die der Radiumbehandlung unterworfenen Kranken.

Auch beim Arbeiten mit Radon ist Schutz gegen Beta- und Gammastrahlen erforderlich. Es gelten daher auch hier viele der oben erwähnten Schutzmaßnahmen.

Die Handhabung soll möglichst während der Zeit seiner relativen Inaktivität erfolgen.

Automatische oder Fernbedienung ist erstrebenswert.

Es ist zweckmäßig, dünne Gummihandschuhe zu tragen, damit die Hände, falls sie mit Radon in unmittelbare Berührung kommen sollten, nicht durch aktiven Niederschlag angegriffen werden.

Der Raum, in dem das Radon bereitet wird, ist mit einem von außen einschaltbaren Saugventilator auszurüsten.

Pumpraum und Aufbewahrungsraum der Radiumlösung sollen getrennt und durch ein Rohr verbunden sein.

Die Radiumlösung selbst ist in einem mit Blei verkleideten Kasten aufzubewahren, der den Vorschriften der DIN Rönt 4/1933 § 6 entspricht.

Schluß.

Ich habe in der vorliegenden Arbeit — soweit dies in solcher Kürze überhaupt möglich war — versucht, einen Überblick über Strahlenschädigungen und Strahlenschutz zu geben.

Nach einigen physikalischen und technischen Vorbemerkungen über die Strahlungen im allgemeinen wurde die Entstehung bezw. Erzeugung der Licht- und Röntgenstrahlen, sowie der Strahlungen der radioaktiven Substanzen dargelegt. Es folgte dann eine Übersicht über die Biologie der Strahlenwirkungen.

Im nächsten Abschnitt wurden zunächst die durch ultrarote, sichtbare und ultraviolette Lichtstrahlen, sodann die durch die Röntgenstrahlen und die Strahlungen der radioaktiven Substanzen hervorgerufenen Strahlenschädigungen behandelt, wobei lokale- und Allgemeinschädigungen unterschieden wurden.

Der zweite Teil der Arbeit umfaßte die Schutzmaßnahmen gegen die Lichtstrahlen, direkte und indirekte Vorkehrungen gegen die Schädigungen durch Röntgenstrahlen und die Schutzmaßnahmen gegen die Strahlungen der radioaktiven Substanzen.

Zusammenfassend kann man wohl sagen, daß bei der gewissenhaften Durchführung der Strahlenschutzvorschriften erst bei schweren, sowieso meist tödlich verlaufenden Erkrankungen, Strahlenschädigungen in größerem Umfange auftreten können. Die wenigen Schädigungen, die aber heute noch ausschließlich auf die Strahlenanwendung zurückzuführen sind, werden keinen Arzt davon abhalten, auf die Benützung der aus Diagnostik und Therapie nicht mehr wegzudenkenden Strahlen zu verzichten.

Herrn Professor Dr. Voltz möchte ich auch an dieser Stelle nochmals für die Überlassung des Themas und für seine wertvolle Unterstützung bei der Ausführung der Arbeit meinen ergebensten Dank aussprechen.

Literaturangabe.

Birk, W. und Schall, L.: Die Behandlung der Kinderkrankheiten mit ultraviolettem Licht und Röntgenstrahlen. Urban & Schwarzenberg, Berlin und Wien 1932.

Ellinger, F.: Die biologischen Grundlagen der Strahlenbehandlung. Urban & Schwarzenberg, Berlin und Wien 1935.

Flaskamp, W.: Über Röntgenschäden und Schädigungen durch radioaktive Substanzen. Urban & Schwarzenberg, Berlin und Wien 1930.

Gauß, C. J.: Lehrbuch der Strahlentherapie, Bd. 4, Gynäkologie. Urban & Schwarzenberg, Berlin und Wien 1929.

Glasscheib, S.: Allgemeine Röntgenkunde. Julius Springer, Wien 1936.

Gundzent, F. und Holthusen, H.: Lehrbuch der Strahlentherapie, Bd. 3, Innere Medizin. Urban & Schwarzenberg, Berlin und Wien 1926.

Kirschmann, K.: Das Röntgenverfahren. Georg Thieme, Leipzig 1930.

Liebesny, P.: Kurz- und Ultrakurzwellen. Urban & Schwarzenberg, Berlin und Wien 1935.

Marburg, O. und Sgalitzer, M.: Die Röntgenbehandlung der Nervenkrankheiten. Urban & Schwarzenberg, Berlin und Wien 1930.

Meyer, Hans: Lehrbuch der Strahlentherapie, Band 1. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Strahlentherapie. Urban & Schwarzenberg, Berlin und Wien 1925.

Müller, R.: Lehrbuch der Hygiene für Ärzte und Biologen. J. F. Lehmann, München 1935.

Roffo, A. H.: Monatsschrift für Krebsbekämpfung, Heft 11, Nov. 36.

Schiler, H.: Leitfaden der technischen Hygiene im medizinischen Betrieb. Georg Thieme, Leipzig 1934.

Schilling, V.: Über die vorsorgliche Erkennung und Verhütung von Strahlenschäden. Die Medizinische Welt, Juni 1932, S. 839.

Werner, R.: Lehrbuch der Strahlentherapie, Bd. 2, Chirurgie. Urban & Schwarzenberg, Berlin und Wien 1925.

Wintz und Rump: Schutzmaßnahmen gegen die Gefahren der Verwendung von Röntgen-, Radium- und ultravioletten Strahlen. Wiener Medizinische Wochenschrift 1932, Nr. 25.

v. Zumbusch, L.: Die Haut- und Geschlechtskrankheiten. J. F. Lehmann, München 1932.

Internationale Kommission für Strahlenschutz, Tagung, Röntgen-Praxis, Organ der Deutschen Röntgengesellschaft, VII. Jahrgang 1935.

Lebenslauf.

Ich wurde am 8. Januar 1911 als Sohn des damaligen Kulturbauführers Eduard Schwab und seiner Ehefrau Eugenie, geborene Günther, zu Nürnberg geboren. Die Volksschule und das Gymnasium bis Untersekunda besuchte ich in Ansbach. Nach dreijährigem Besuch des Alten Gymnasiums in Würzburg machte ich dort mein Abitur am 17. März 1932.

Darauf studierte ich 5 Semester Medizin an der Universität in Würzburg bis Juli 1934. Anschließend bestand ich dort meine ärztliche Vorprüfung.

Ich studierte dann ein Semester an der Universität in München bis März 1935, zwei Semester in Freiburg bis Februar 1936 und die letzten drei Semester bis Juni 1937 wieder in München Medizin.

Die ärztliche Prüfung, die am 13. September begonnen hatte, bestand ich am 17. Dezember 1937 in München.